

# METHODES DE NEUROIMAGERIE

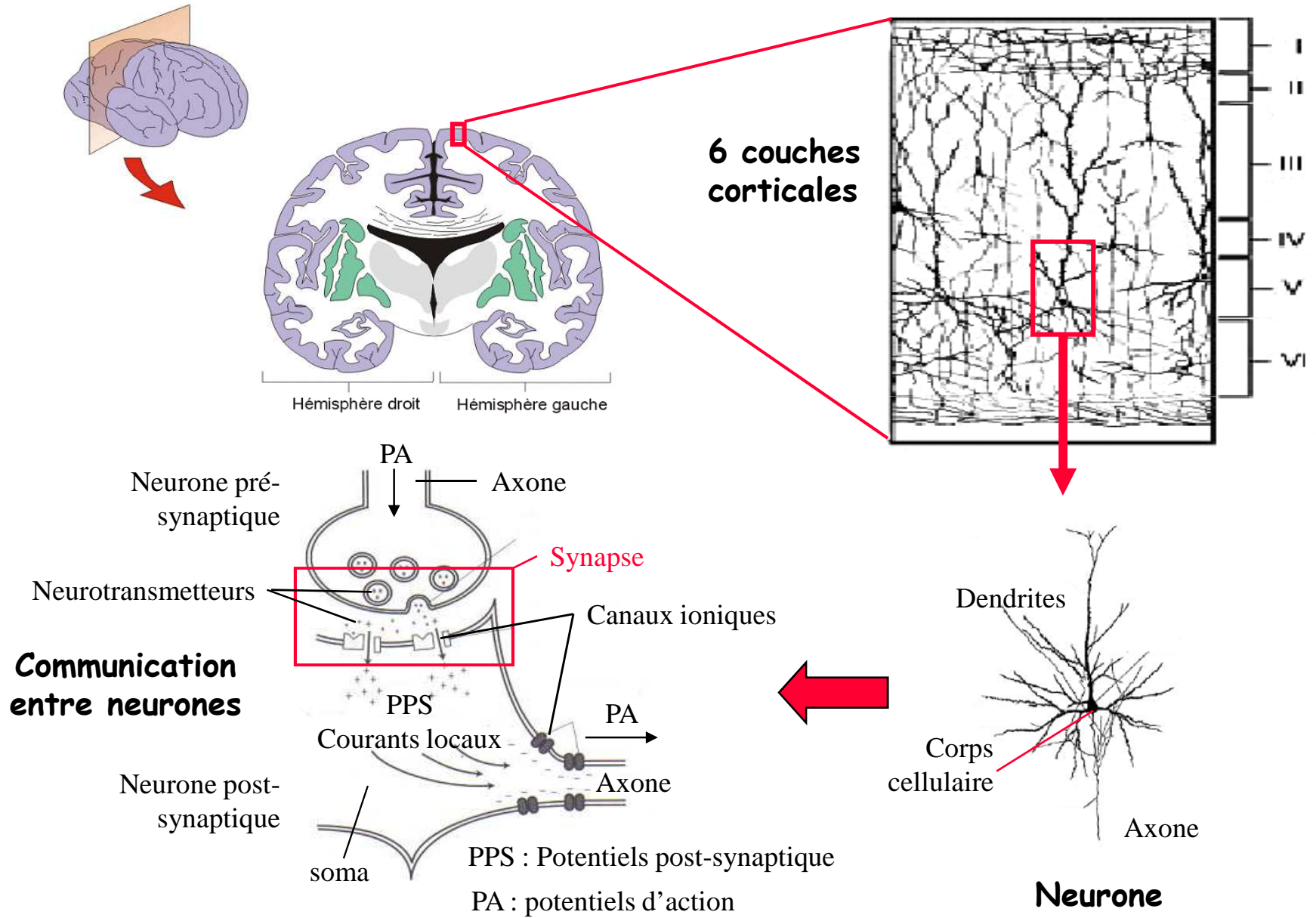
## Electroencéphalographie (EEG) & Magnétoencéphalographie (MEG)

Aurélie Campagne, PhD, MCF

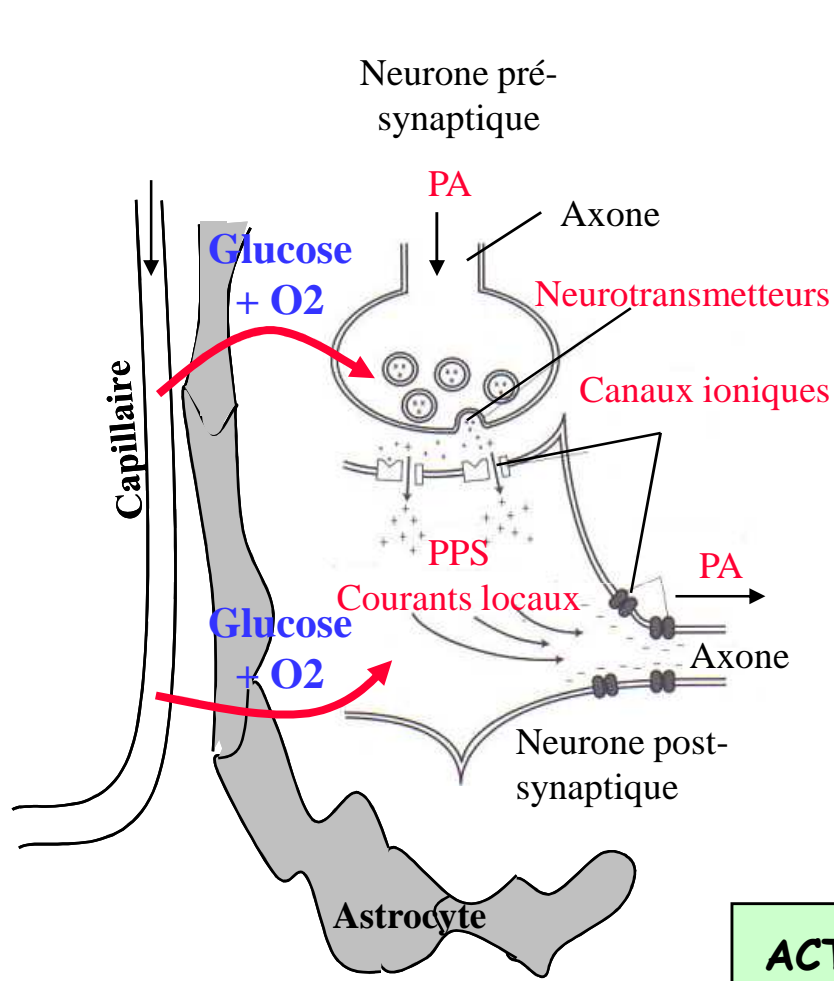
Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, CNRS UMR  
5105, Université Pierre Mendès France, Grenoble

# Introduction

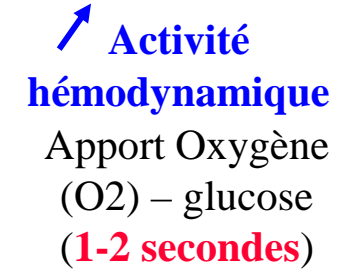
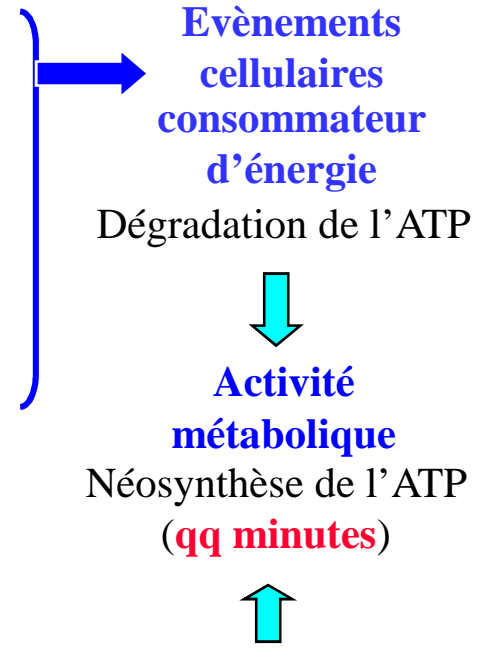
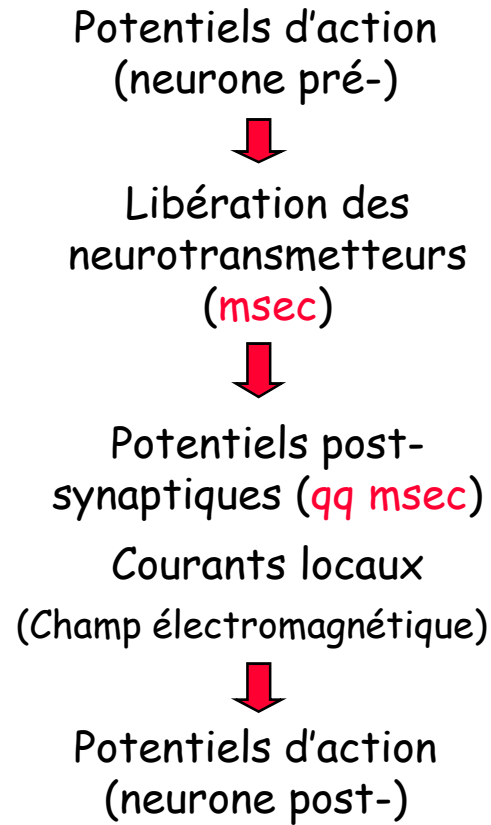
# Niveaux d'organisation cérébrale - Neurophysiologie



# Introduction



PA : potentiels d'action  
 PPS : Potentiels post-synaptique



**ACTIVITE CEREBRALE**

- Signaux chimiques
- Signaux électro-magnétiques
- Variations métaboliques et hémodynamiques

# Introduction

Mesure de l'activité  
électriques cérébrales

Techniques invasives  
intracérébrales

Techniques

Techniques non invasives  
de surface : EEG et MEG

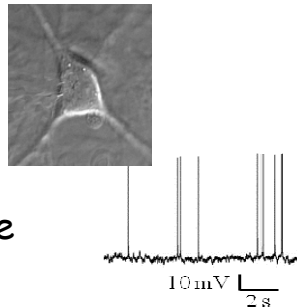
Activités locales

Activités  
enregistrées

Activités globales

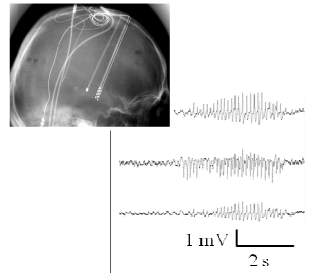
Activités unitaires

Potentiel de repos  
Potentiel post-synaptique  
Potentiel d'action

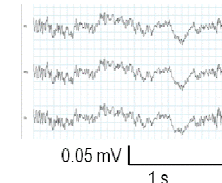


Potentiels de champs

Activités d'une  
population de neurones  
d'un site donné



Activités de  
populations de  
neurones d'une  
région de surface  
donnée



# Origines des signaux EEG et MEG



EEG

1er EEG : 1929, Hans Berger

Enregistrement en surface des  
variations du potentiel électrique



MEG

1er MEG : 1968, Cohen - MIT

Enregistrement en surface des  
variations du champ magnétique

↓  
résultant de la sommation de l'activité unitaire de  
populations importantes de neurones synchrones

# Origine signaux EEG et MEG

signaux EEG et MEG  
issus



**Sommations temporelle et spatiale des potentiels post-synaptiques (PPS) des cellules pyramidales du cortex cérébral**

**Potentiel d'action (PA)**

**Potentiel post-synaptique (PPS)**

❖ Diminution très rapide du champ de potentiel généré par PA avec distance

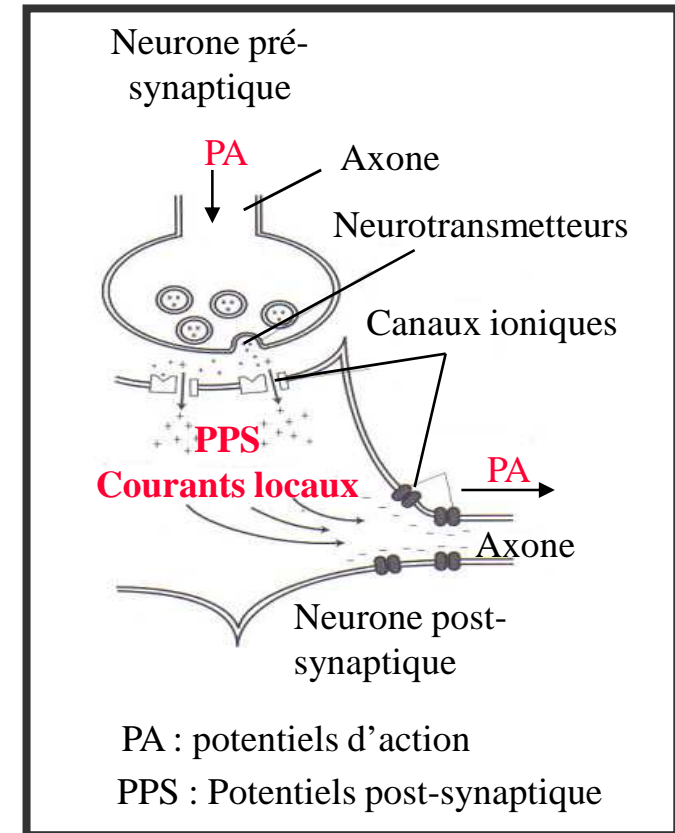
❖ Diminution moins rapide du champ de potentiel généré par PPS avec distance

Avantage par rapport à la distance de conduction entre sources et surface du scalp

❖ durée PA trop brève (<5 ms)

❖ Durée + longue (qq 10aines msec)

Plus favorable à la synchronisation temporelle de l'activité d'un grand nombre de neurones nécessaire à une visualisation en EEG ou MEG



# Origine signaux EEG et MEG

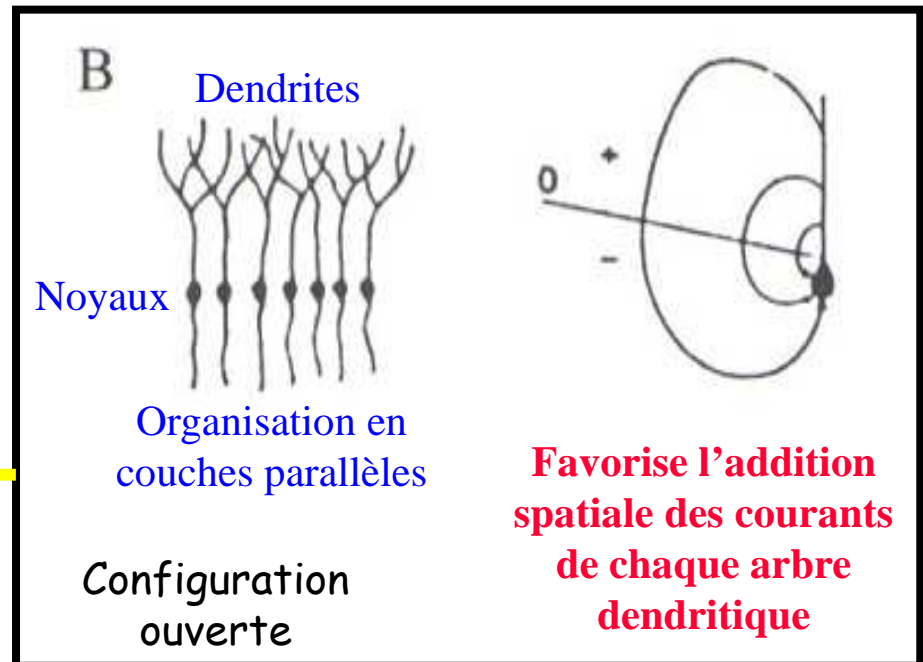
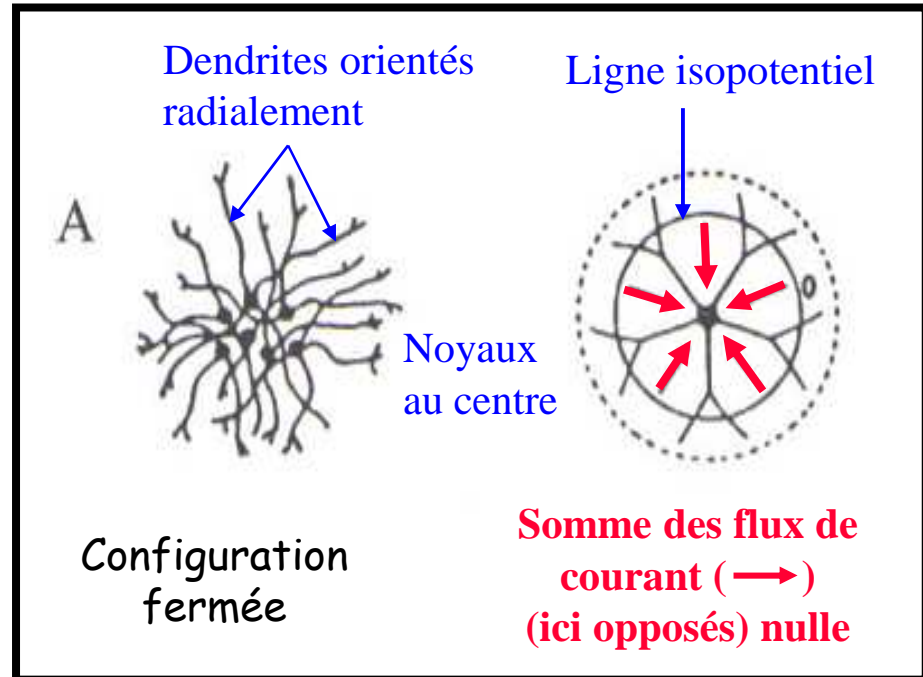
signaux EEG et MEG  
issus



**Sommations temporelle et spatiale**  
des **potentiels post-synaptiques (PPS)**  
des **cellules pyramidales** du cortex  
cérébral et non des potentiels d'action

**Pourquoi PPS des cellules  
pyramidales ?**

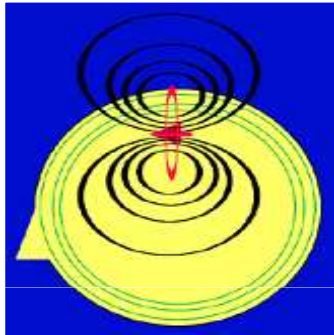
Organisation parallèle des neurones  
pyramidaux plus favorable à la  
sommation spatiale des courants  
nécessaire à une visualisation en EEG  
ou MEG



# Origine signaux EEG et MEG

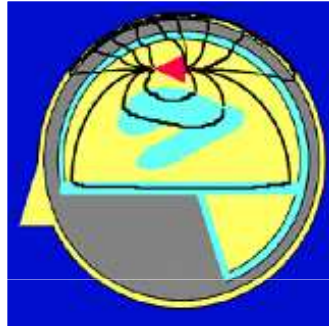
**Champ magnétique  
(mesure MEG)**

Induit essentiellement  
par **courants primaires**

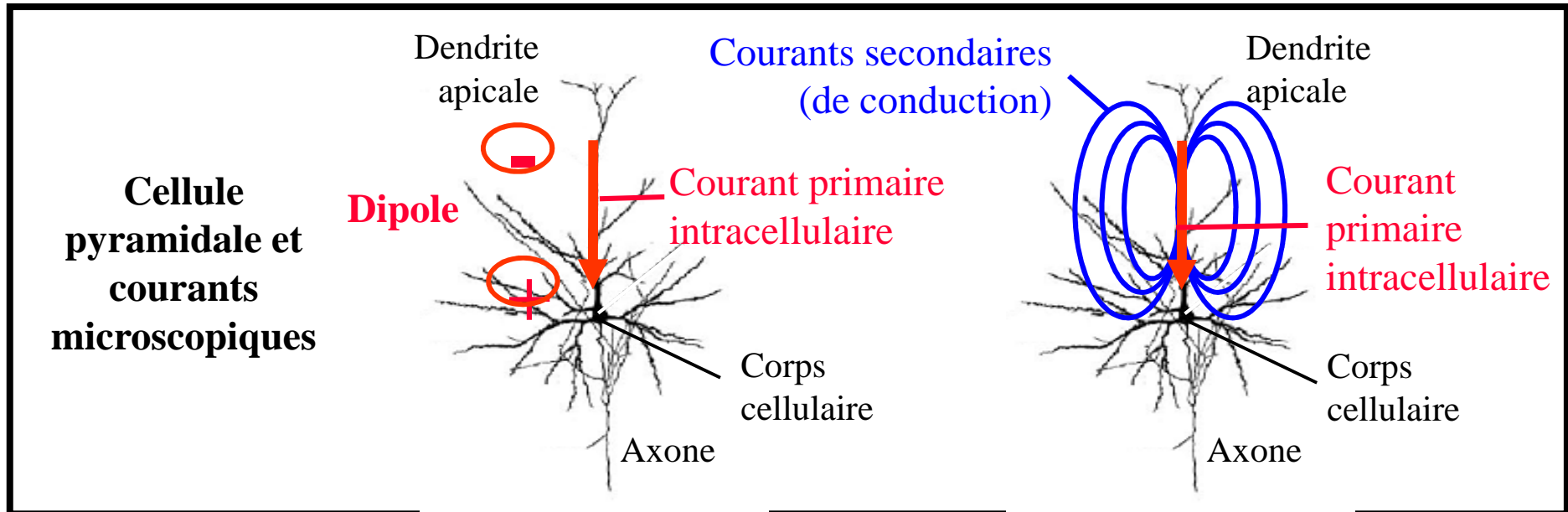
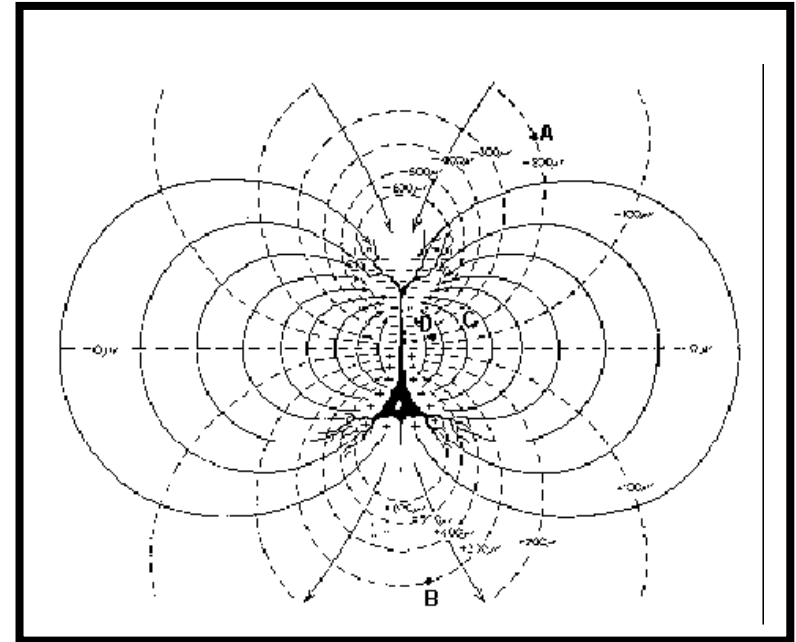


**Potentiel électrique  
(mesure EEG)**

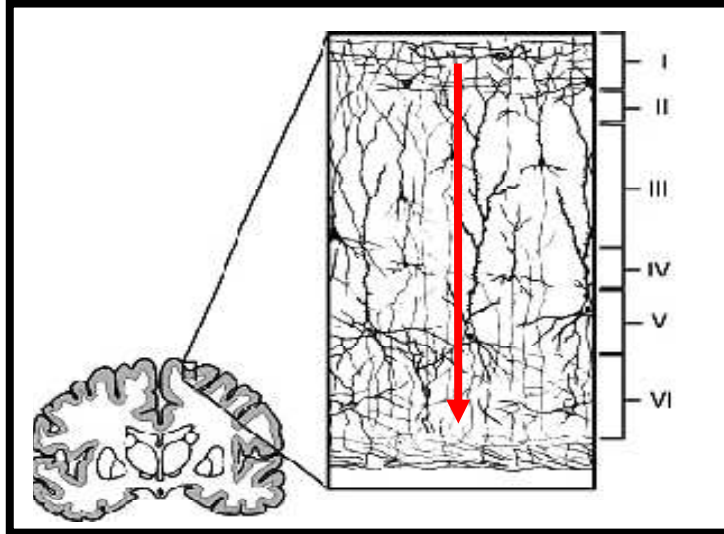
lié au **courants secondaires**



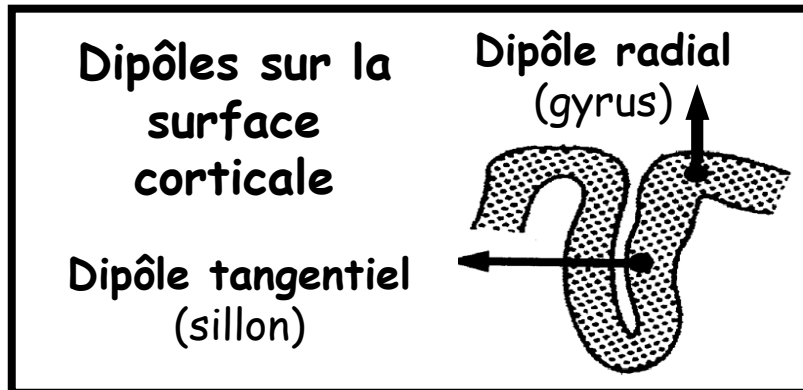
## Courants de conduction



## Dipôle de courant Macro-colonne corticale ( $10^5$ à $10^6$ neurones)



Dipôle décrit par la longueur et la direction du flux de courant de la macro-colonne corticale

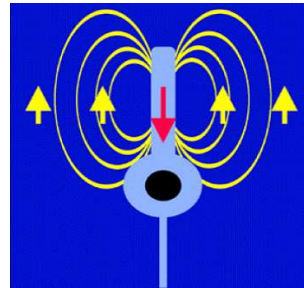


## Origine signaux EEG et MEG

Chaque courant

↓  
**EEG**

Potentiel négatif



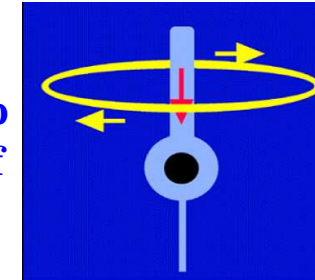
Potentiel positif



Champ magnétique  
perpendiculaire à la  
distribution du potentiel

**MEG**

Champ  
négatif



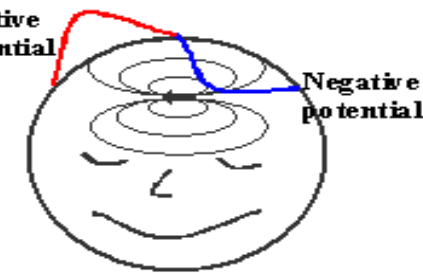
Champ  
positif

**T**angential

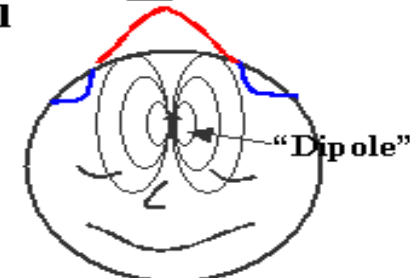
Positive  
potential



Negative  
potential



**R**adial



# Origine signaux EEG et MEG

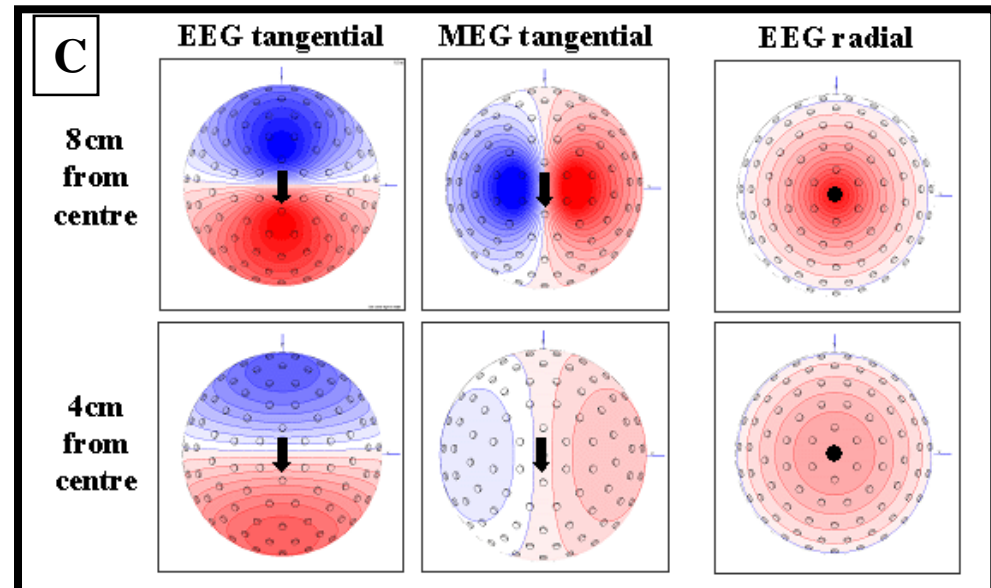
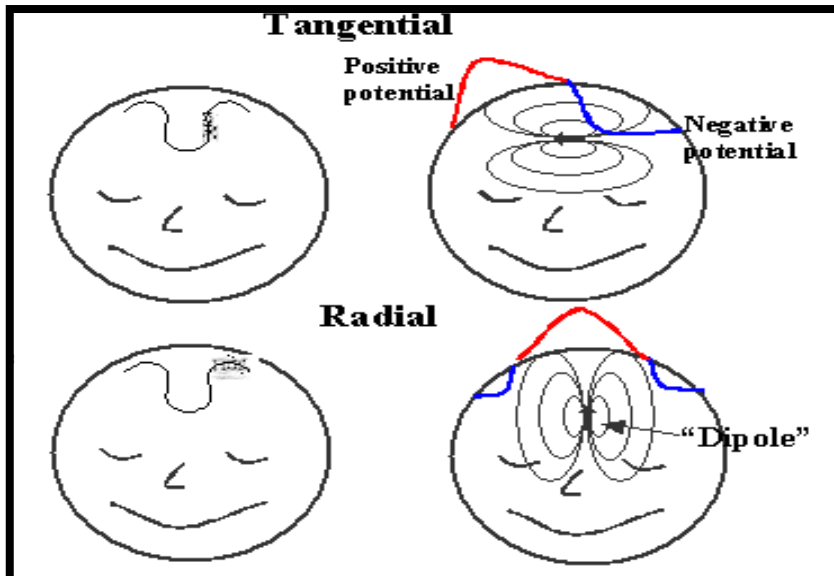
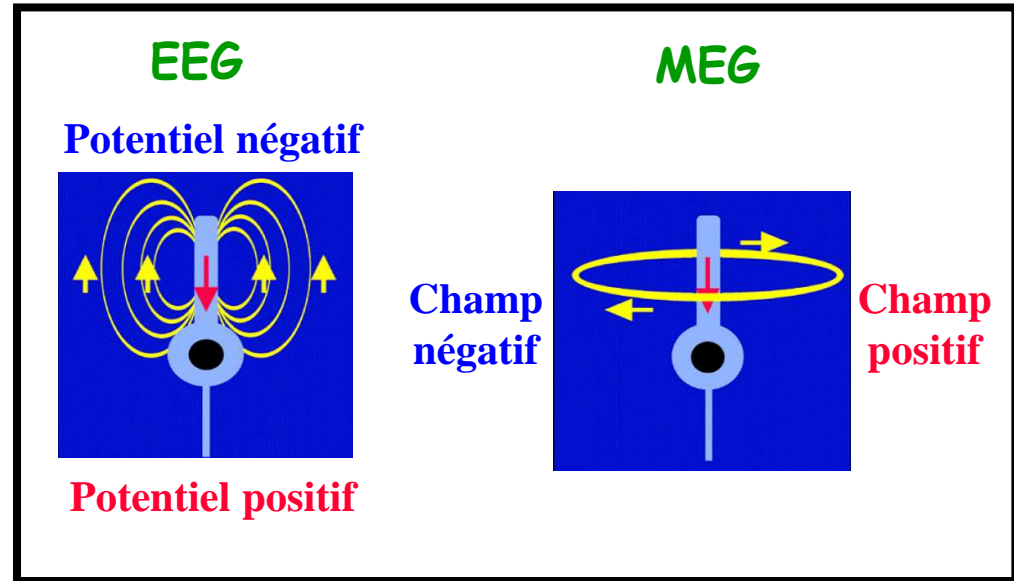
## Réponse topographique ( C )

Simulation de la distribution du champ magnétique et du potentiel électrique pour des dipôles de différente orientation et profondeur par rapport au centre de la tête



Amplitude signal avec l'éloignement  
Amplitude signal avec profondeur  
(particulièrement MEG)

Dispersion du signal avec profondeur (particulièrement EEG)



# Dispositifs et principes de mesure : EEG et MEG

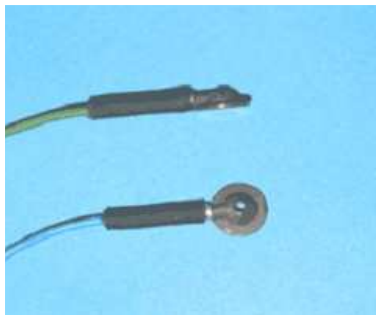
EEG

Pour une topographie de l'activité cérébrale précise



positionnement de plusieurs dizaines à centaines d'électrodes

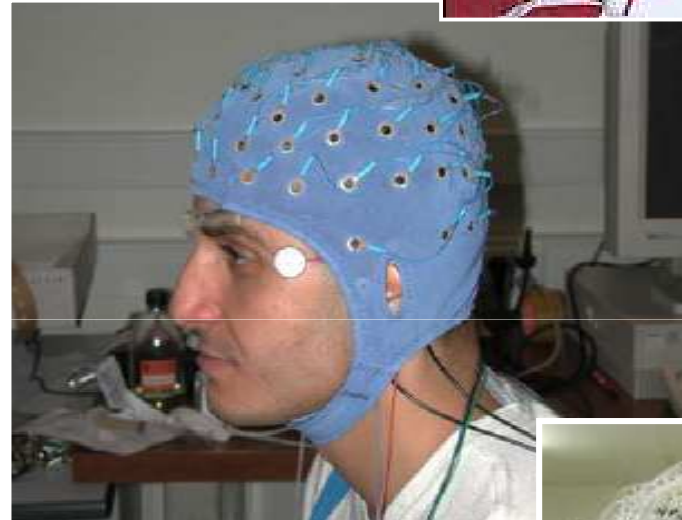
Electrodes Ag/AgCl, impolarisables



Pâte conductrice



Casques d'enregistrement



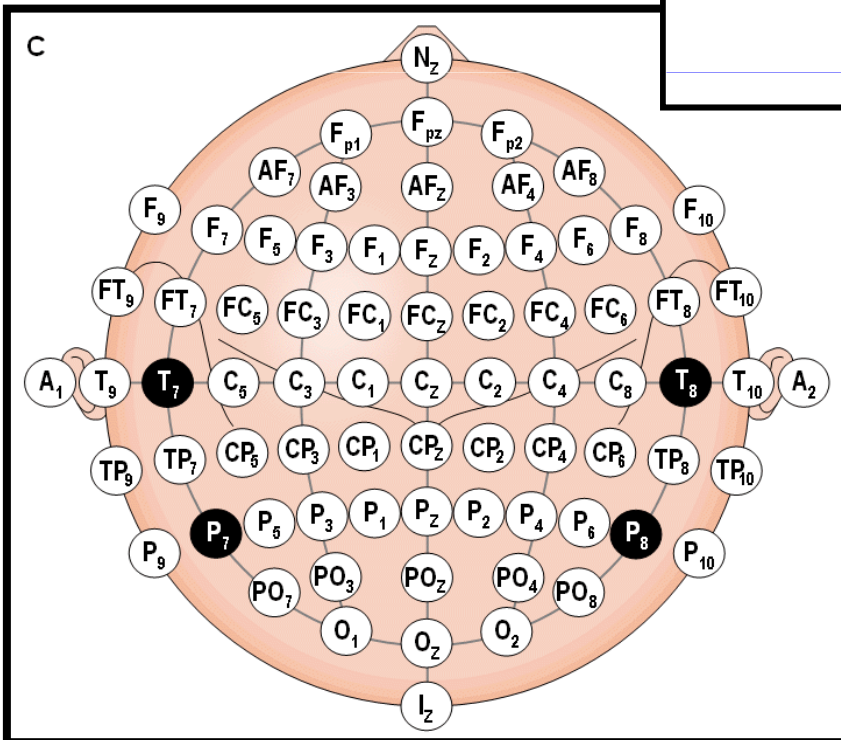
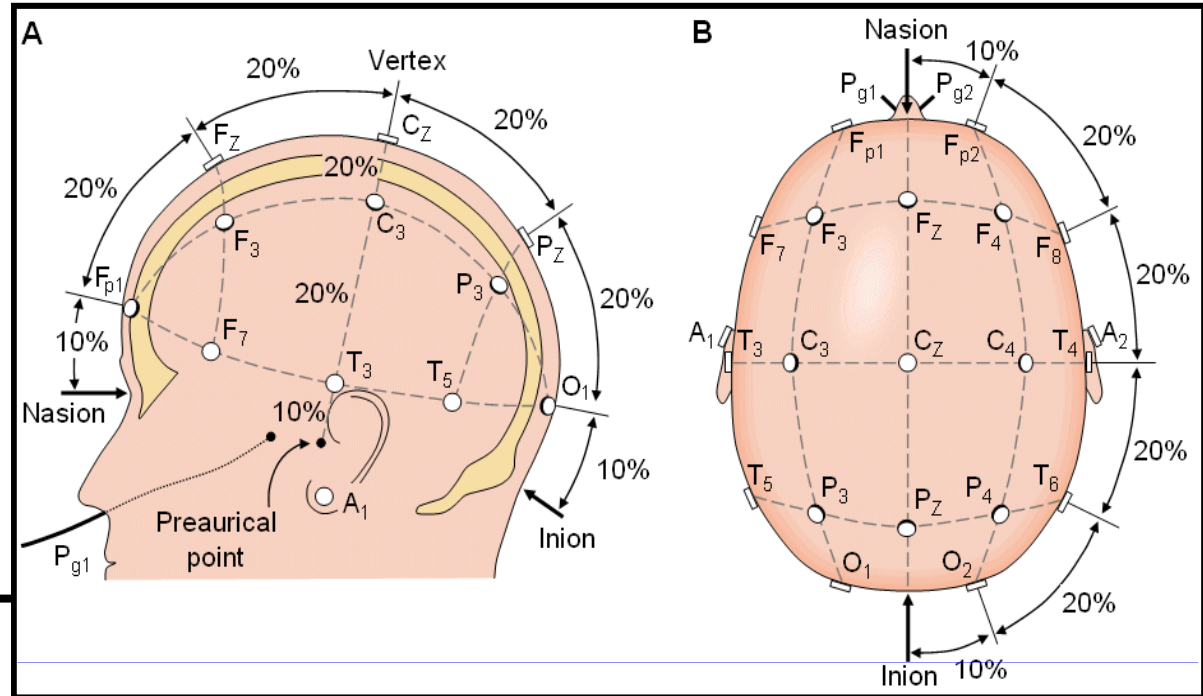
# EEG

## Mise en place des électrodes

➤ **Système international 10-20**

(A) Vue sagittale gauche de la tête

(B) Vue horizontale dorsale de la tête



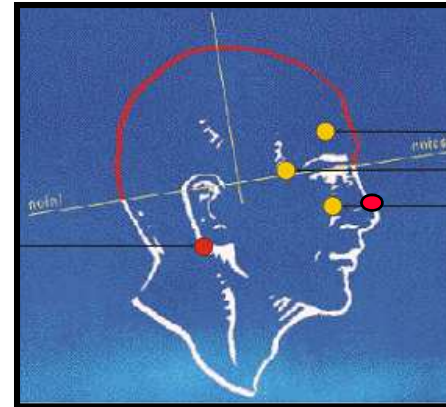
A = lobe de l'oreille  
 Pg = nasopharyngiale  
 O = occipital.  
 P = pariétal  
 C = central  
 F = frontal  
 Fp = frontal polaire

➤ **Localisation des électrodes et nomenclature**  
 (Sharbrough, 1991.).

# EEG

Décours temporel des variations électriques locales apparaissant sous une ou entre deux électrodes données

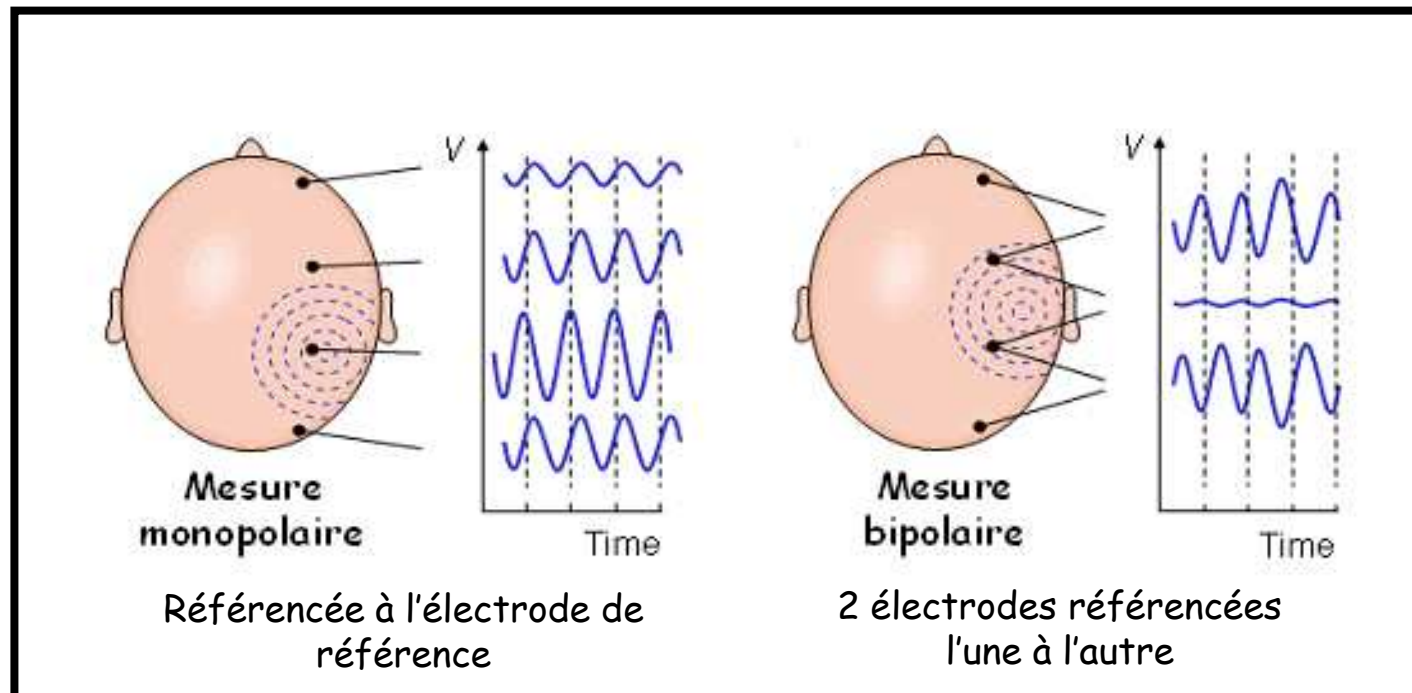
- ❖ Mesure monopolaire
- ❖ Mesure bipolaire



➤ Electrodes de référence et de masse

1 référence (●)

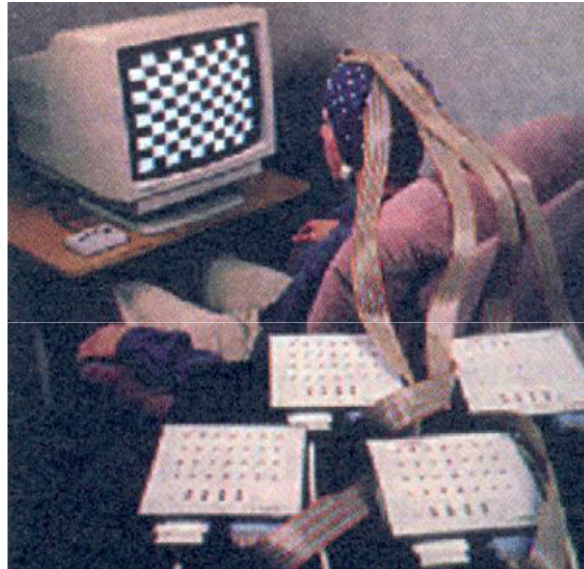
1 masse (homoplate)



# Dispositifs et principes de mesure : EEG et MEG

## EEG

VARIATIONS  
DE POTENTIEL  
ÉLECTRIQUES  
recueillis via  
électrodes



Systeme  
d'acquisition (PC)

Amplificateurs

Acquisition passive, mesure en temps réel

Ordre de grandeur des variations : quelques microvolts

Résolution temporelle : 1 ms, Echantillonnage : jusqu'à 1000Hz

# Dispositifs et principes de mesure : EEG et MEG

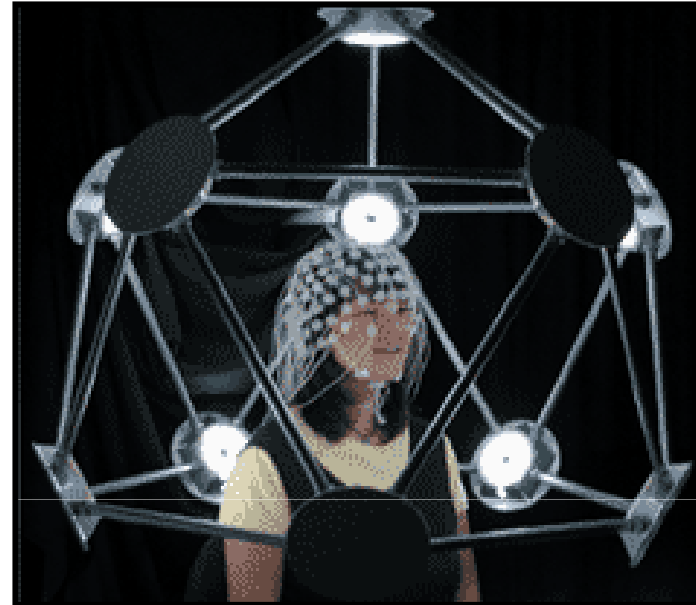
## EEG

En vue de la localisation des générateurs électriques

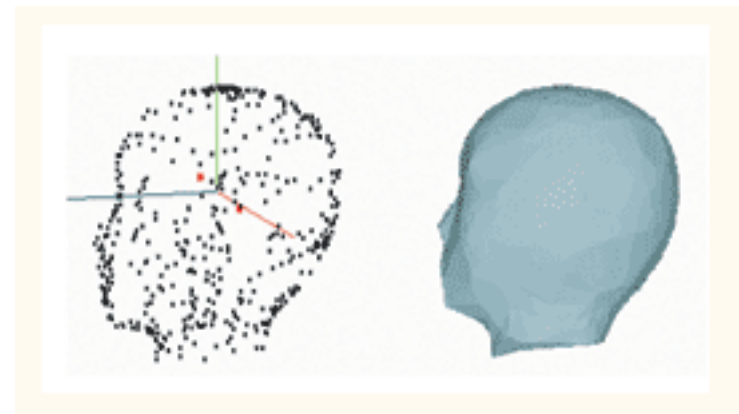
Digitalisation de la position des capteurs et du contour de la peau



Recalage MEG – IRM par minimisation de la distance entre points numérisés et surface de la peau extraite de l'IRM

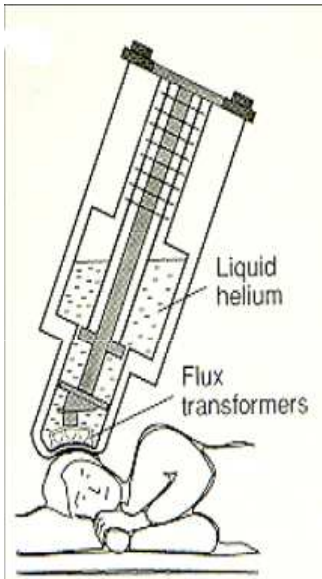


*Geodesic Photogrammetry system*



# Dispositifs et principes de mesure : EEG et MEG

## MEG



Détection :

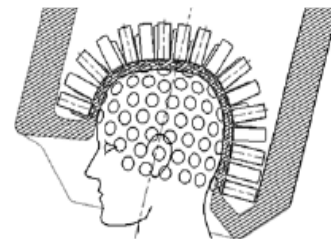
Bobines réceptrices de flux

+

Transformateurs de flux : squids (1ère amplification)



Casque



Cerveau et psychologie, O. Houdé et al., Edition Puf, 2002



Chambre blindée



**SQUIDS** : *Supraconducting Quantum Interference Device*

= Dispositif fonctionnant à très basse température (refroidi à l'hélium liquide)

Mesure en temps réel  
Ordre de grandeur des variations :  $10^{-13}$  tesla  
Résolution temporelle : 1 ms ; Echantillonnage : jusqu'à 1000Hz

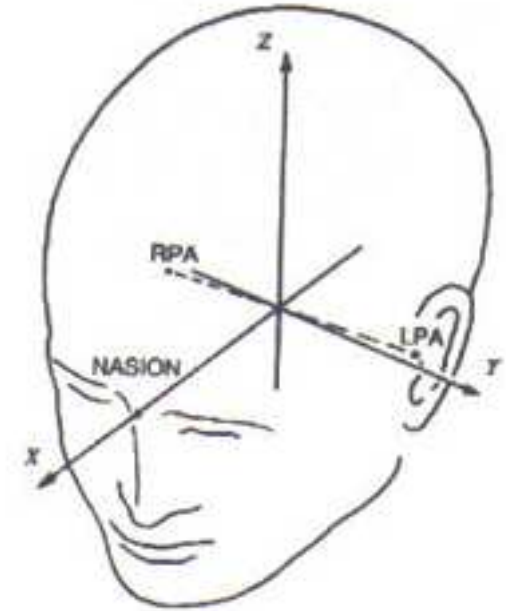
# MEG

En vue de la localisation  
des générateurs  
électromagnétiques

Système de mesure de la position  
de la tête par rapport au casque

3 points de référence

- NASION
- Péri-auriculaire droit (RPA)
- Péri-auriculaire gauche (LPA)

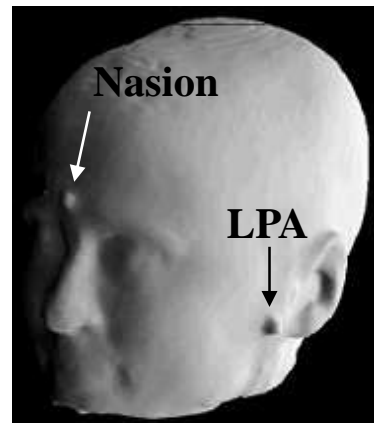


1



2

Pose de marqueurs visible à l'IRM à  
l'emplacement des points de références

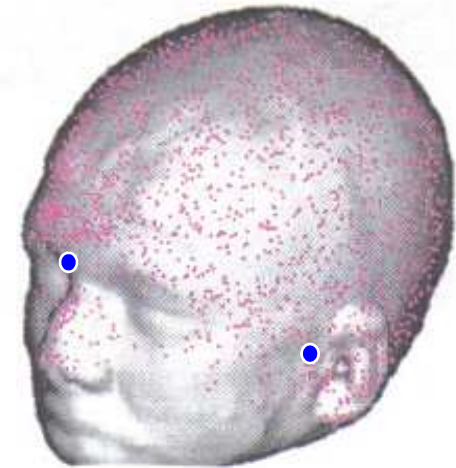


3

Numérisation de la  
position des  
capteurs et du  
contour de la peau

+

Recalage MEG – IRM  
par minimisation de la  
distance entre points  
numérisés et surface de  
la peau extraite de l'IRM



## DIFFERENCE EEG ET MEG : RECAPITULATIF

### MEG

- Mesure le champ magnétique
- Réponse dipolaire perpendiculaire à la direction du dipôle
- Réponse focale
- Peu affecté par tissus cérébraux
- Sélectif pour sources tangentielles
- Peu sensible aux sources profondes
- Appareillage coûteux

### EEG

- Mesure le potentiel électrique
- Réponse dipolaire parallèle à la direction du dipôle
- Réponse diffuse
- Très affecté par les tissus
- sensible à toutes orientations
- sensible aux sources profondes
- Appareillage moins cher

# Signaux EEG et MEG

Décours temporel des variations électriques et magnétiques locales apparaissant sous une ou entre deux électrodes données

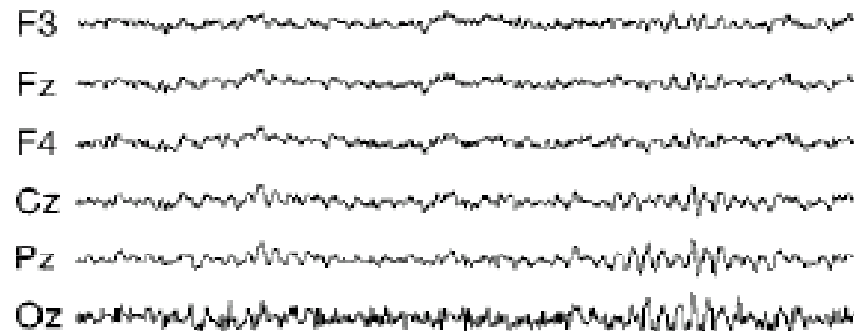
Ordre de grandeur des variations  
MEG :  $10^{-13}$  tesla  
EEG : qq microvolts

## Activité spontanée continue cérébrale

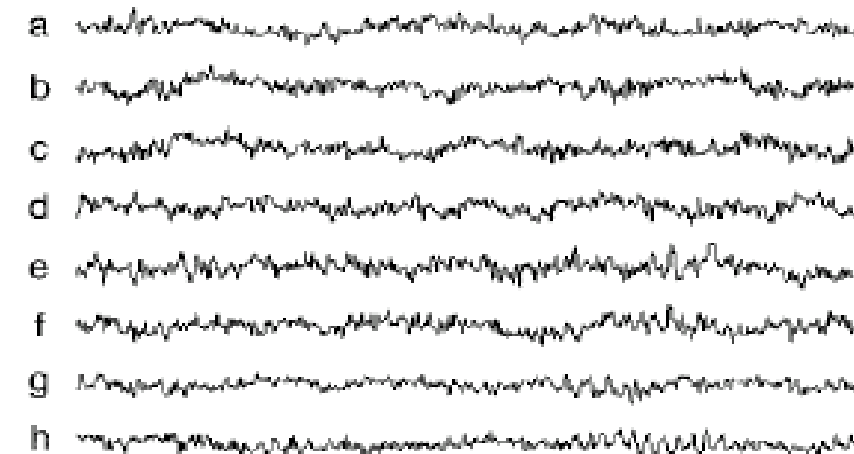
I

rest

EEG

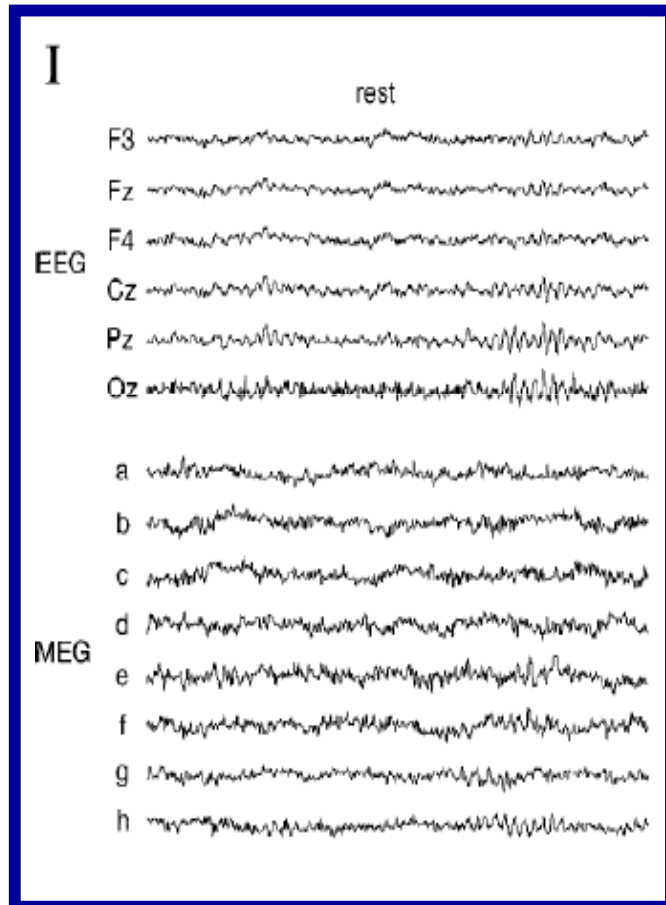


MEG



# Traitement des signaux EEG et MEG

Données brutes



Echantillonnage  
jusqu'à 1000 Hz

Pré-traitement

Filtrage

Correction des  
artéfacts

- physiologiques
- extraphysiologiques

ANALYSE  
DES  
DONNEES

# Traitement des signaux EEG et MEG

## Correction des artéfacts

### Filtrage

- ❖ **Filtre passe haut**  
Atténue fréquences sous la fréquence filtre  
(laisse passer fréquences au dessus de la fréquence filtre)
- ❖ **Filtre passe bas**  
Atténue fréquences au-dessus de la fréquence filtre
- ❖ **Filtre passe bande**  
Filtres passe haut + passe bas : définition d'une bande de fréquence
- ❖ **Filtre par bande**  
Atténue la bande de fréquence définie  
**Ex : Elimination de l'artéfact lié au secteur (50Hz ou 60 Hz)**

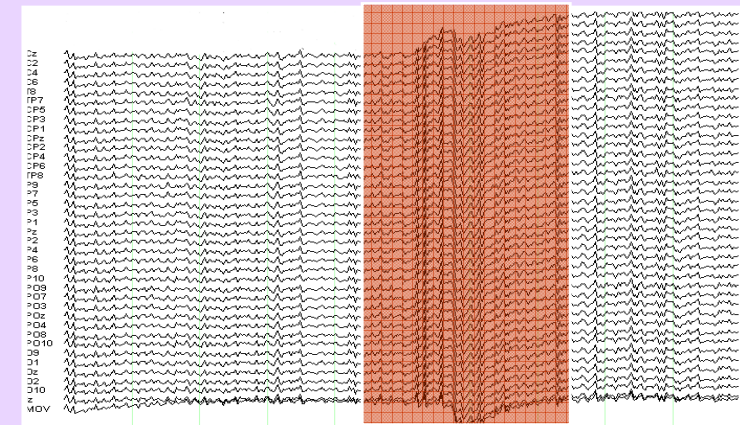
**Artéfacts physiologiques** : mouvements oculaires, activité cardiaque, musculaire, ...

mouvements oculaires



**Artéfacts extra-physiologiques** : mouvements câbles, calibrage, ...

mouvements des câbles



# Analyse des signaux EEG et MEG

## ❖ Rythmes cérébraux

Définis selon leur :

- Fréquence
- Amplitude
- Morphologie
- Localisation
- Circonstances psychophysologiques
- Maintien
- Disparition

### Autres rythmes :

Mu ( $\mu$ ), Kappa ( $\kappa$ ),  
Lambda ( $\lambda$ ), Phi ( $\phi$ )

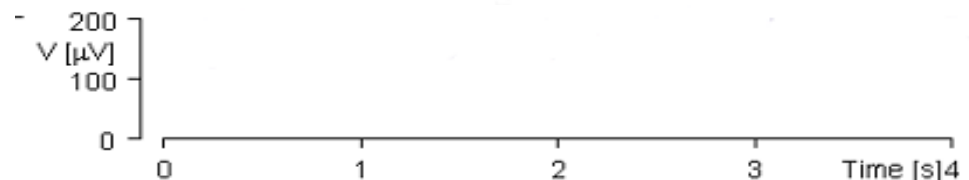
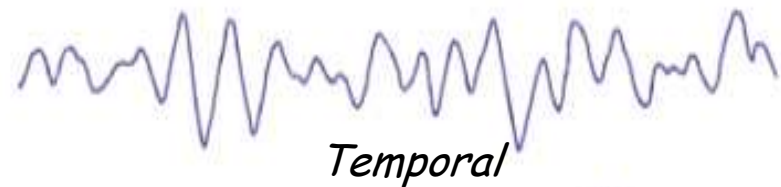
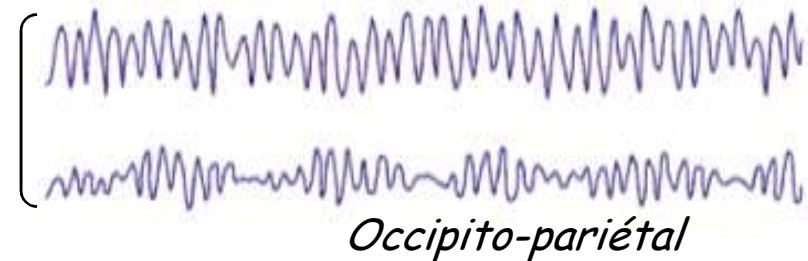
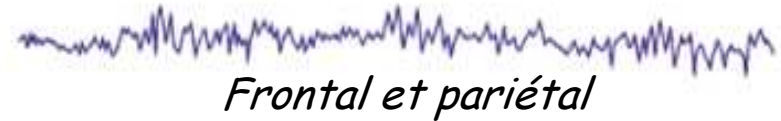
**Gamma ( $\gamma$ )**  
> 30 Hz  
2-20  $\mu V$

**Beta ( $\beta$ )**  
14-30 Hz  
2-20  $\mu V$

**Alpha ( $\alpha$ )**  
8-13 Hz  
20-60  $\mu V$

**Theta ( $\theta$ )**  
4-8 Hz  
10-100  $\mu V$

**Delta ( $\delta$ )**  
0.5-4 Hz  
75-200  $\mu V$

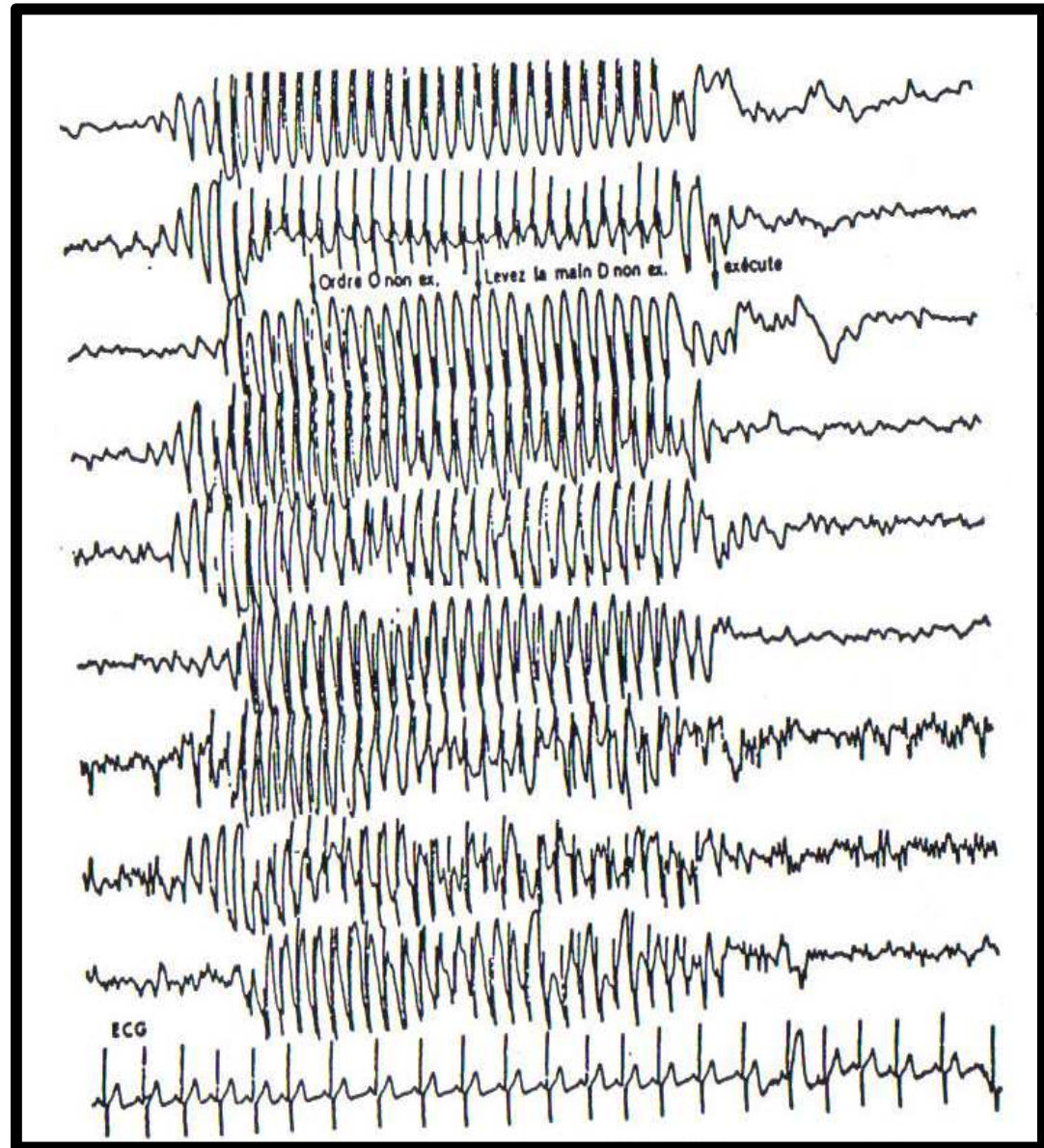


# Analyses des signaux EEG et MEG : types

Intérêt de l'analyse spectrale des rythmes dans le diagnostic de différentes pathologies :

Ex : épilepsie, tumeurs cérébrales, traumatismes crâniens, ...

Ex : Crise d'absence en EEG



# Analyses des signaux EEG et MEG : types

Par rapport à un état cognitif  
donné ou à un stimulus donné

❖ Rythmes ↔ Niveaux d'éveil et Stades du sommeil

❖ Rythmes ↔ Pathologie

❖ Rythmes ↔ Code universel de l'activité cérébrale

Assemblées neuronales synchrones ⇒ fonctions cognitives

(association, intégration)

[Basar et al., 2000; Varela, 1995]

❖ Origine de rythmes ?

➤ interactions cortico - sous-corticales (thalamus)

➤ interactions cortico - corticales

❖ Liens Rythmes ↔ Potentiels et Champs magnétiques Évoqués ?

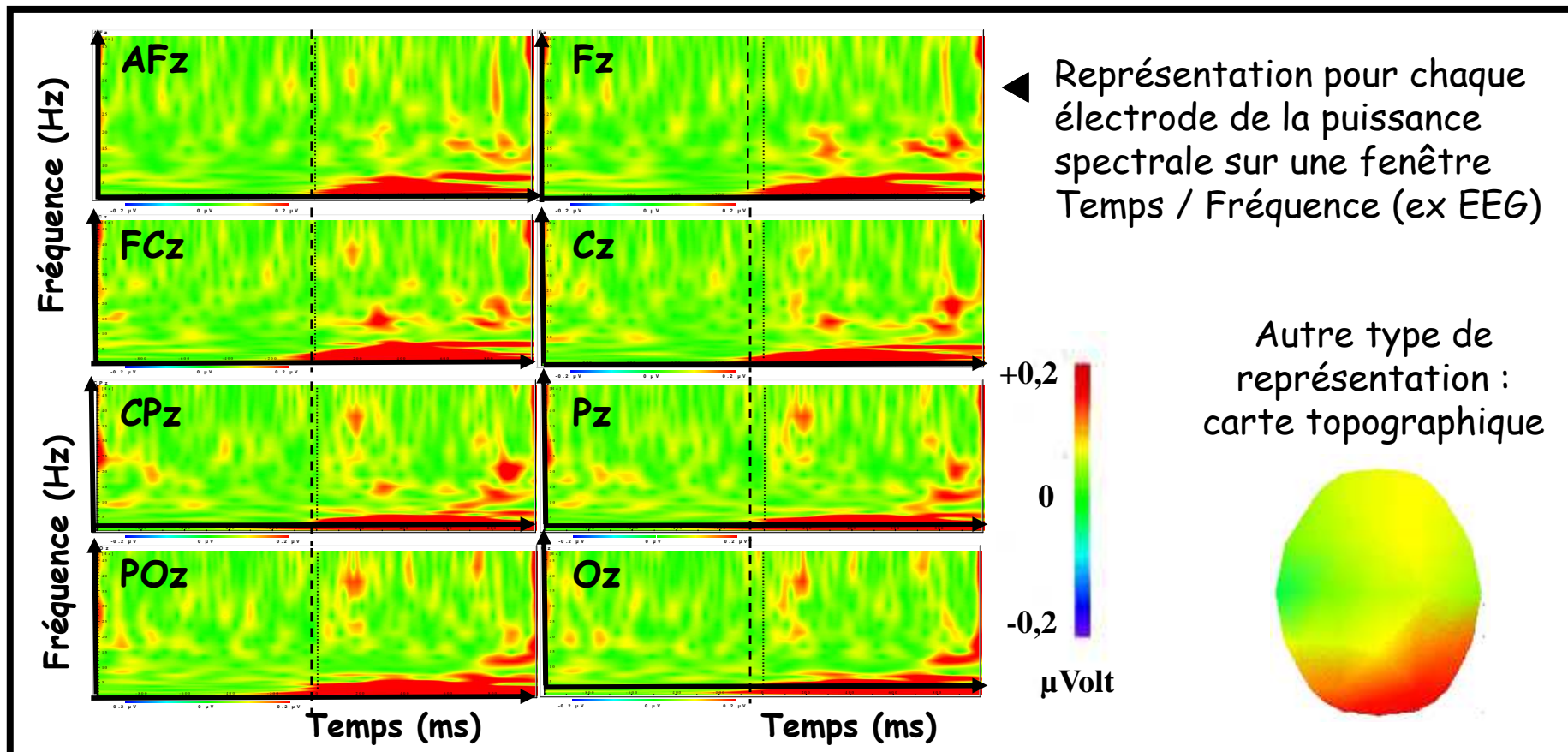
# Analyses des signaux EEG et MEG : types

Par rapport à un état cognitif donnée ou à un stimulus donné

1

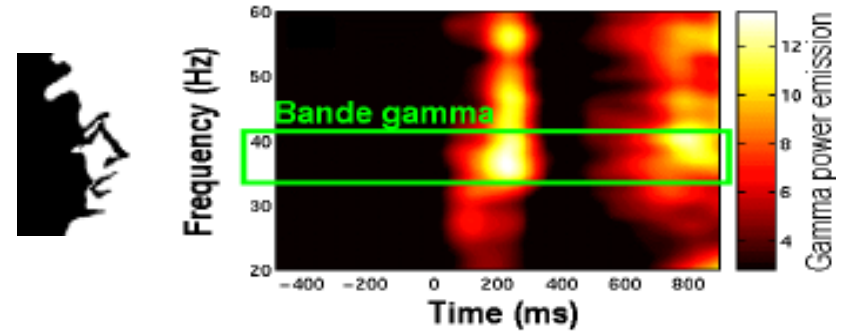
Analyse de la puissance spectrale

Pour chaque électrode  
Pour chaque bande de fréquence au cours du temps



Attention (30-50Hz),  
Conscience (50-100Hz), liage  
perceptif, mémoire

**Gamma ( $\gamma$ )**  
> 30 Hz



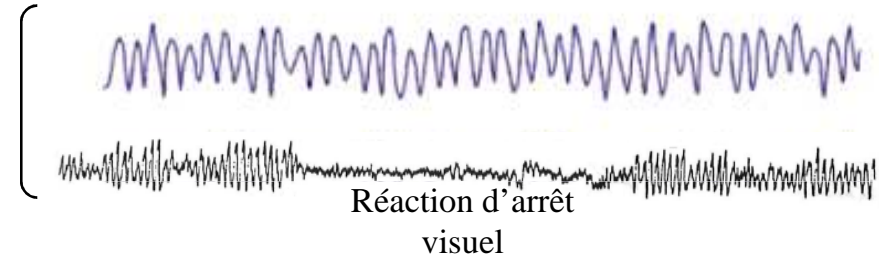
Eveil attentif,  
sommeil paradoxal,

**Beta ( $\beta$ )**  
14-30 Hz



Etat de relaxation, sommeil  
paradoxal, réaction d'arrêt  
visuel (yeux ouverts -yeux  
fermés)

**Alpha ( $\alpha$ )**  
8-13 Hz



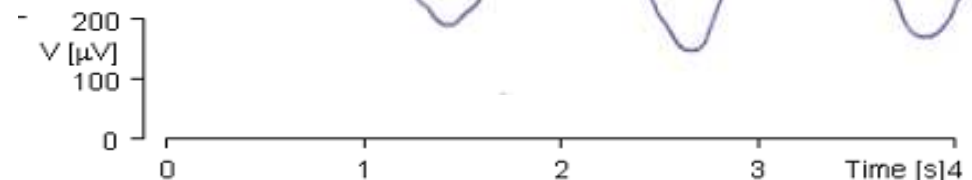
Hypovigilance sévère  
(Centro-Pariétal), Emotion ou  
cognition (frontal, temporal)

**Theta ( $\theta$ )**  
4-8 Hz



Sommeil  
profond

**Delta ( $\delta$ )**  
0.5-4 Hz



Corrélat fonctionnels et  
origines pas totalement  
établis

# Analyses des signaux EEG et MEG : types

Par rapport à un état cognitif donné ou à un stimulus donné

2

## Analyse des **synchronisations et désynchronisations neuronales**

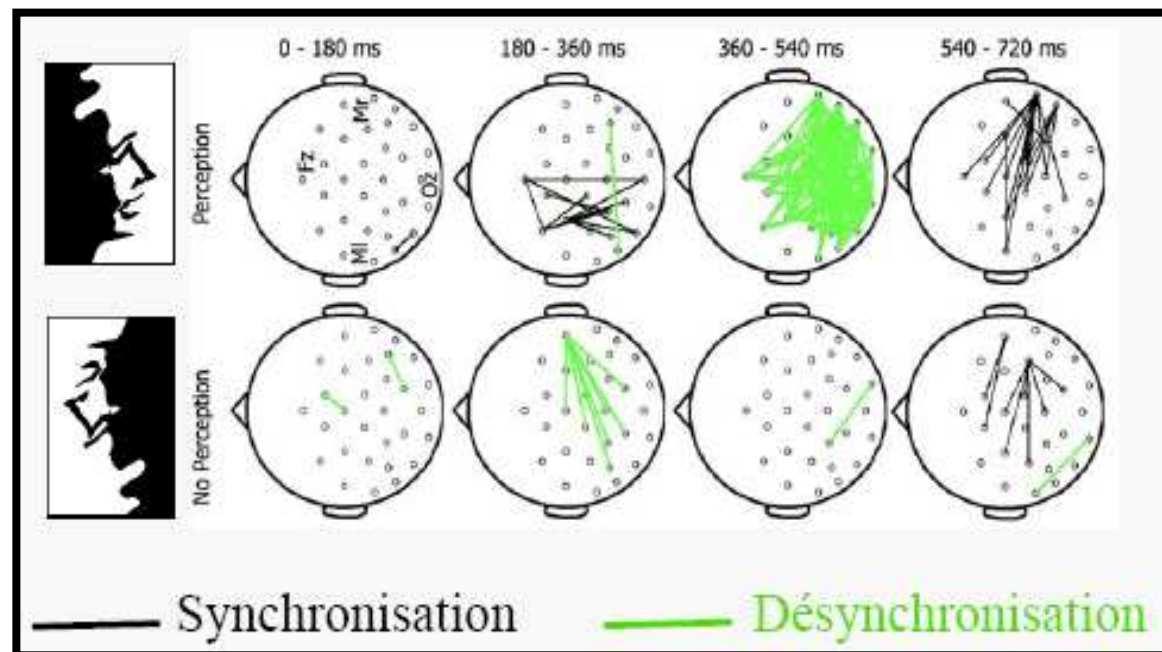
Etude des synchronisations de phase entre neurones d'une même aire (local) et entre deux aires cérébrales différentes (à distance)

Pour **chaque électrode**

Pour **chaque bande de fréquence d'intérêt au cours du temps**

Rend compte de la dynamique cérébrale et des interactions neuronales

Ex 1 : Liage perceptif  
Rythme gamma



# Analyses des signaux EEG et MEG : types

Par rapport à un état cognitif donné ou à un stimulus donné

2

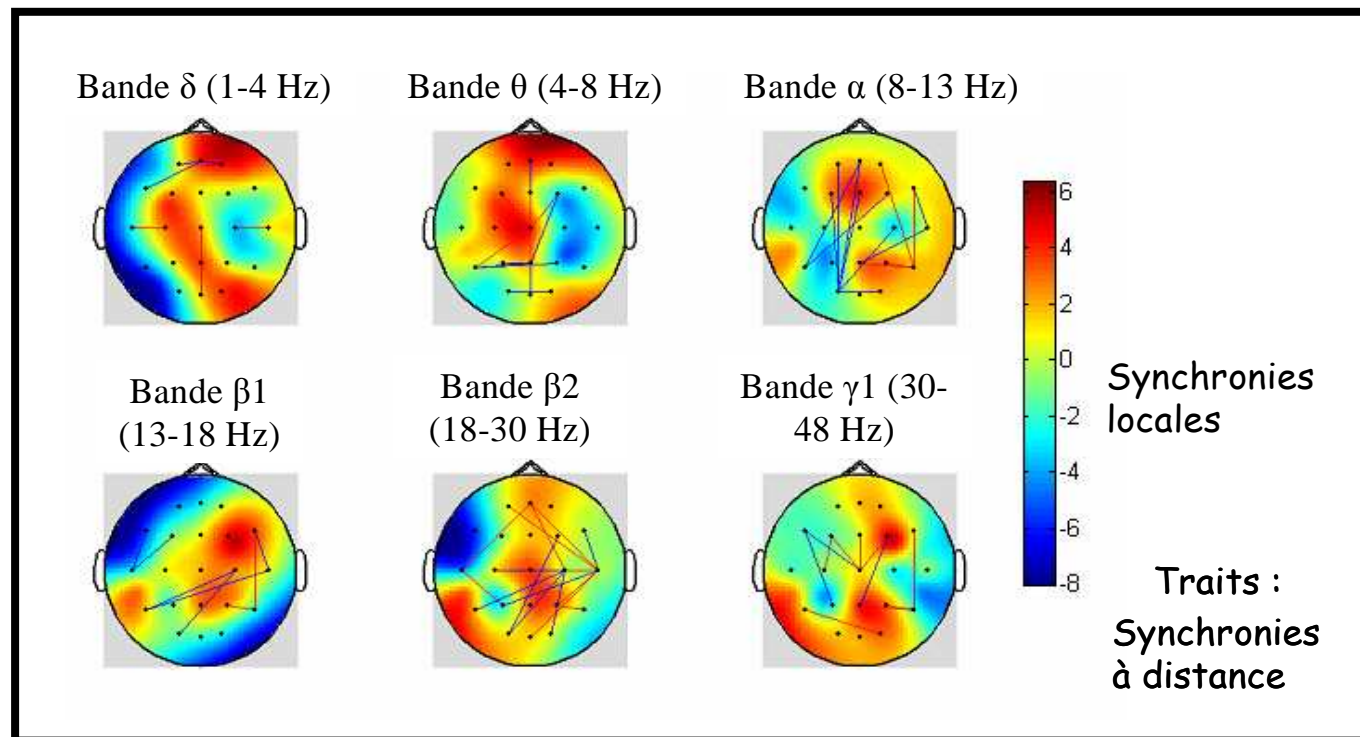
## Analyse des **synchronisations et désynchronisations neuronales**

Etude des synchronisations de phase entre neurones d'une même aire (local) et entre deux aires cérébrales différentes (à distance)

Pour **chaque électrode**

Pour **chaque bande de fréquence d'intérêt au cours du temps**

Ex 2:  
Micro-éveil  
versus  
Sommeil paradoxal



# Analyses des signaux EEG et MEG : types

Par rapport à un état cognitif donné ou à un stimulus donné

2

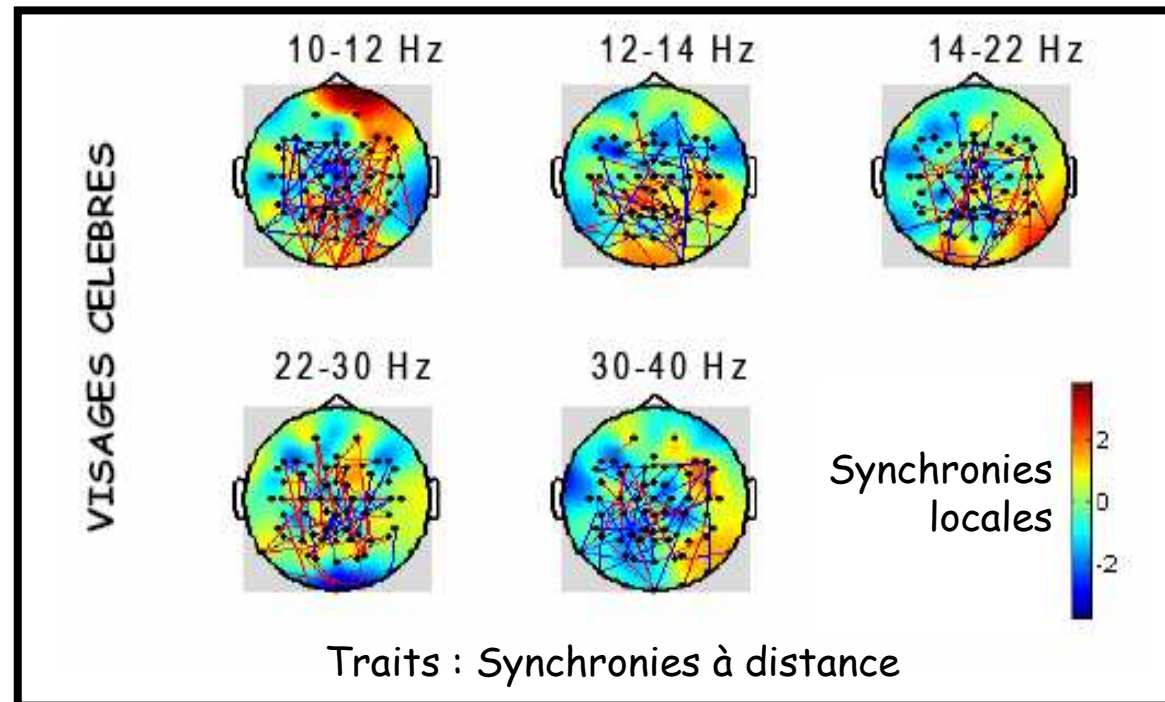
## Analyse des **synchronisations et désynchronisations neuronales**

Etude des synchronisations de phase entre neurones d'une même aire (local) et entre deux aires cérébrales différentes (à distance)

Pour **chaque électrode**

Pour **chaque bande de fréquence d'intérêt au cours du temps**

Ex 3:  
Perception consciente  
versus  
Perception non consciente  
des visages connus



# Analyses des signaux EEG et MEG : types

Par rapport à un état cognitif donné ou à un stimulus donné

3

Analyse des **potentiels et champs magnétiques évoqués (PE, EF)**

=

Variations de potentiels et de champs magnétiques temporellement associées à un stimulus



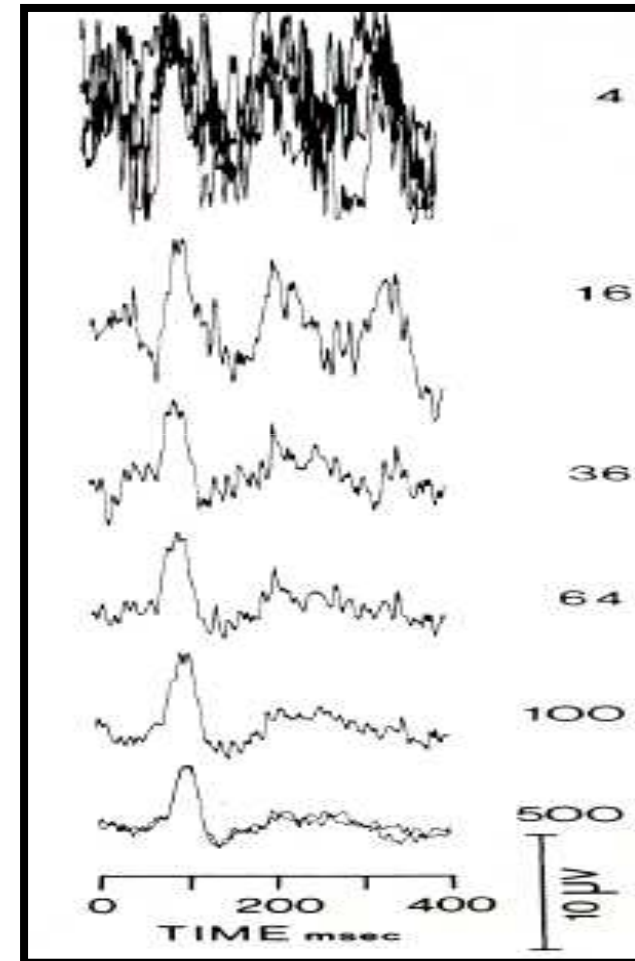
Difficulté d'identification : déformations noyées dans l'activité spontanée (bruit de fond)

Mise en évidence par répétition du stimulus

+

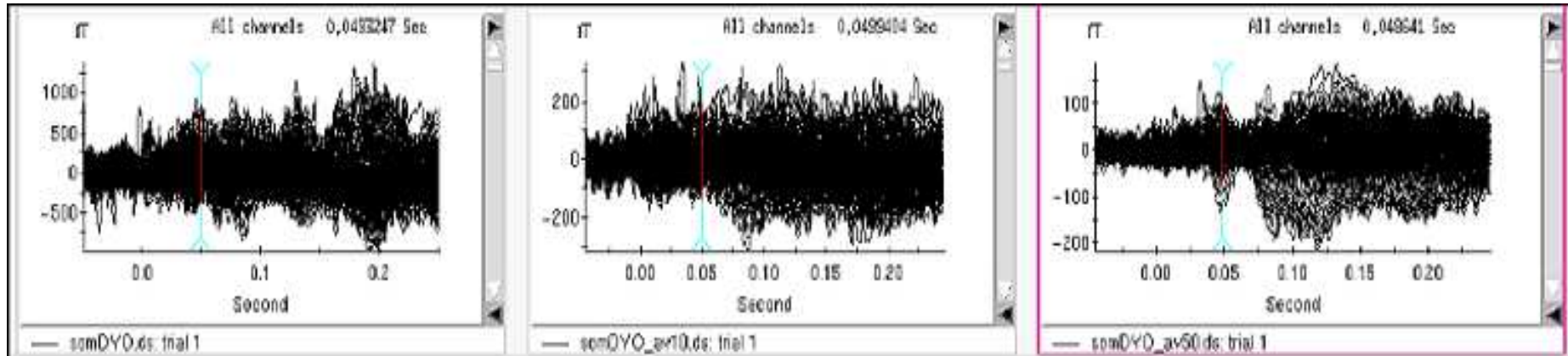
Moyennage des signaux synchronisés au stimulus (Dawson, 1937)

Propriété de reproductibilité des événements neuronaux évoqués par la stimulation et la tâche, et de l'état du sujet

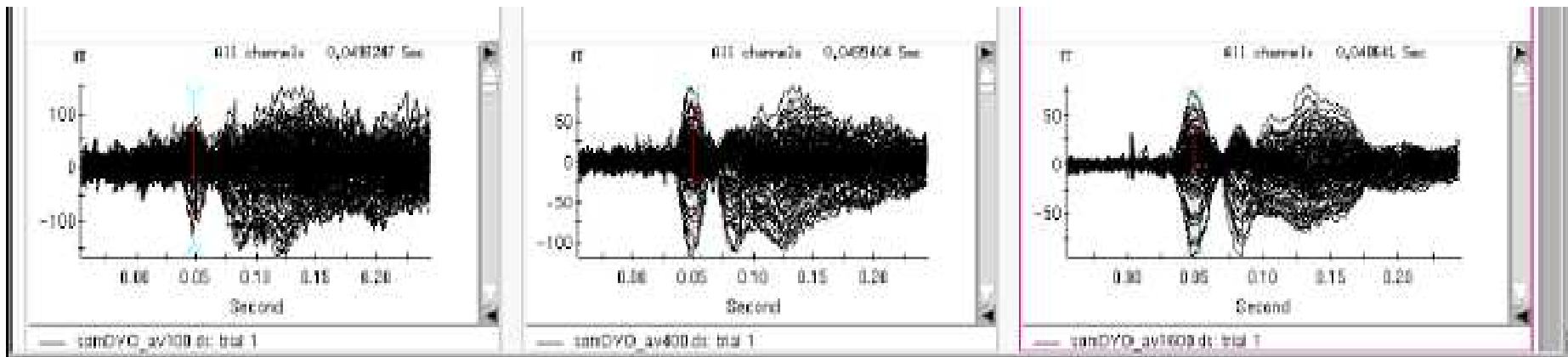


Répétition du stimulus (Ex : EEG)

## Influence du nombre d'essais (Ex: MEG)



Augmentation du nombre d'essais



Augmentation du nombre d'essais

## 3

# Potentiel et champ magnétiques évoqués

## Nomenclature des réponses

Définies par la latence, amplitude et forme, polarité

- Nxxx : onde EEG négative à xxx ms
- Pxxx : onde EEG positive à xxx ms
- Mxxx : champ magnétique à xxx ms

## Composantes

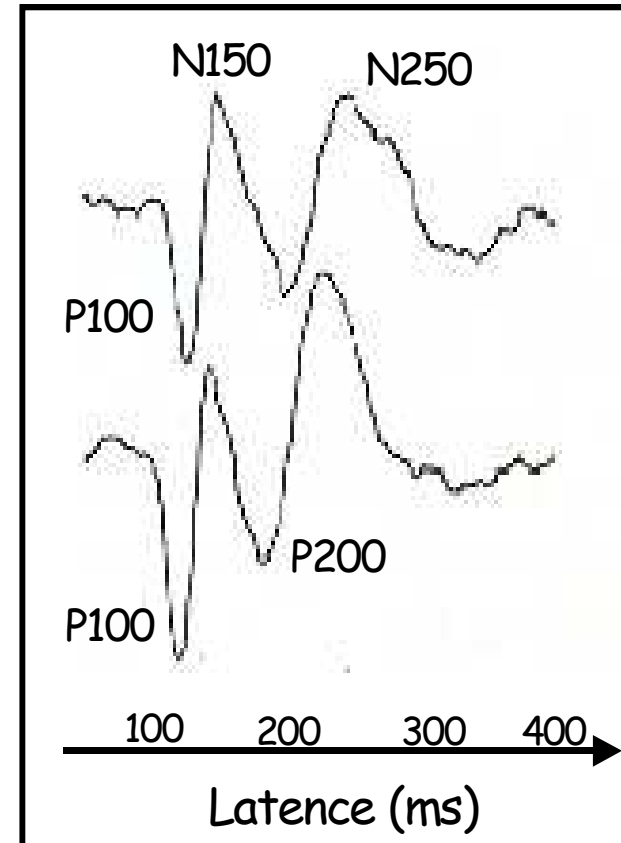
- Composantes **précoces** (exogènes)

= composantes primaires exogènes liées aux caractéristiques du stimulus

- Composantes **tardives** (endogènes)

= composantes secondaires endogènes non spécifiques liées

↔ { caractéristiques de la tâche  
(signification du stimulus / tâche)  
comportement / état su sujet



3

## Potentiel et champ magnétiques évoqués

### Composantes précoces (exogènes)

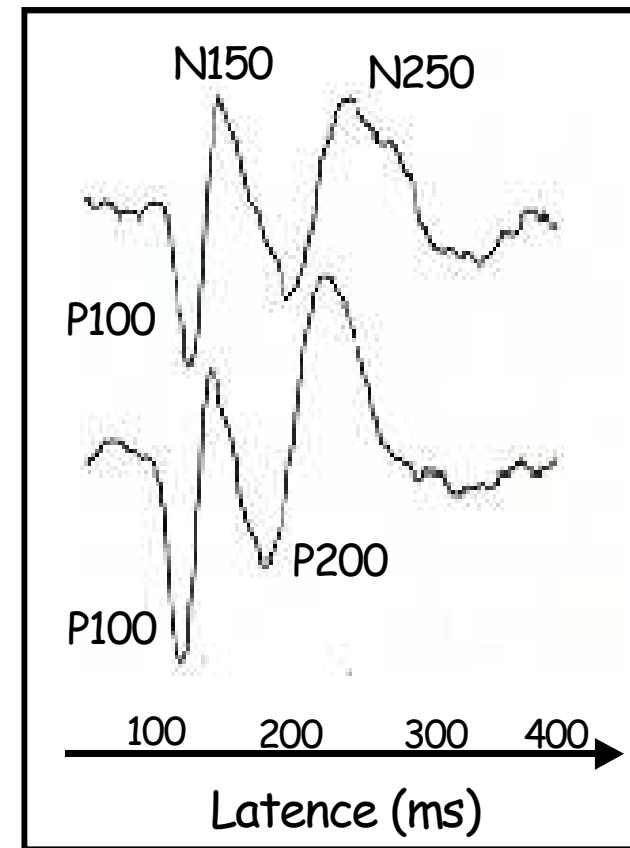
- ❖ Latence  $\ll$  200 msec
- ❖ Etapes de cheminement et de traitement de l'information dans les voies sensorielles

EEG : périphérie, moelle épinière, tronc cérébral, cortex

MEG : cortex

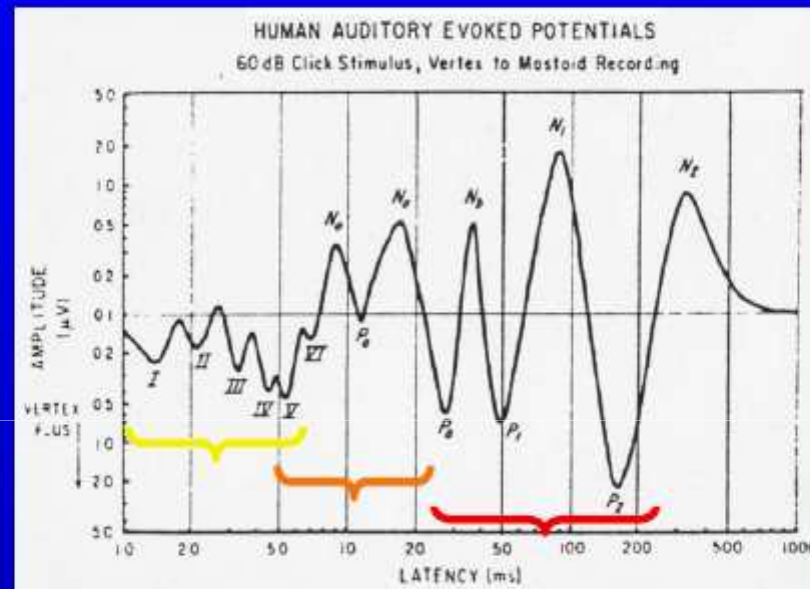


*Suivant la modalité  
sensorielle*



## Composantes précoces (exogènes)

❖ Depuis la cochlée jusqu'au cortex auditif



$\leq 10$  ms : PE de très courte latence ou BAEPs,  
Brain-Stem Auditory Evoked Potentials (nerf auditif, tronc cérébral)

$\leq 50$  ms : PE de latence « moyenne » (thalamus, cortex)

$\leq 100-150$  ms : PE de latence « longue » (cortex)  $\longrightarrow$  N100 / M100

3

## Potentiel et champ magnétiques évoqués

### Composantes tardives (endogènes)

- ❖ Latence > 200 msec Néanmoins
  - chevauchement important
  - effet de variables endogènes sur des composantes exogènes

- ❖ Lié à l'attitude du sujet / signification qu'il accorde à l'événement par rapport à la tâche

Facteurs d'influence

- Probabilités de l'événement déviant
- Organisation des séquences (distribution des événements déviants)
- Intervalle entre stimulations
- Nature de la tâche (degré d'implication du sujet, hypothèse sur la situation)

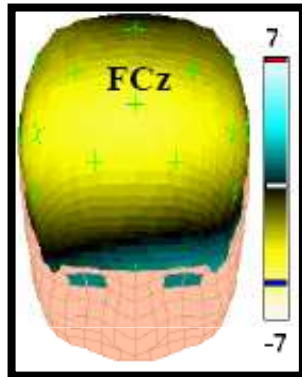
### ❖ Composantes tardives

- Complexe N200 – P300
- Onde N400
- Onde P600
- Variation Contingente Négative (VCN)
- Potentiel de préparation motrice

## Composantes tardives (endogènes)

1ères composantes endogènes  
décrites : VCN et P300

### Variation Contingente Négative (Walter et al, 1964)

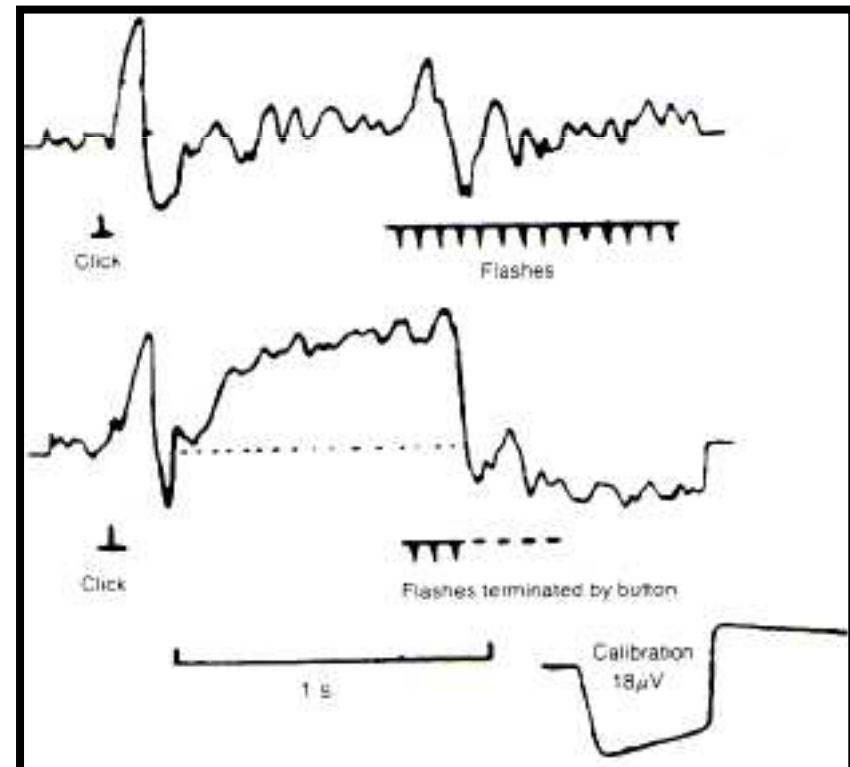


❖ Onde négative fronto-central lente

❖ se développe entre  
deux stimuli appariés

- temporellement
- dans le contexte  
de la tâche

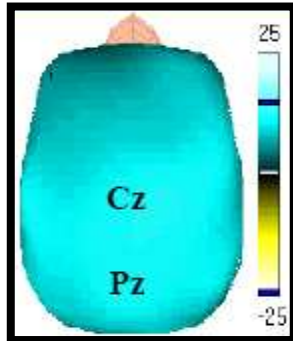
- ❖ lié à
- l'attention d'agir
  - à la motivation
  - à l'estimation temporelle
  - à l'activation énergétique



## Composantes tardives (endogènes)

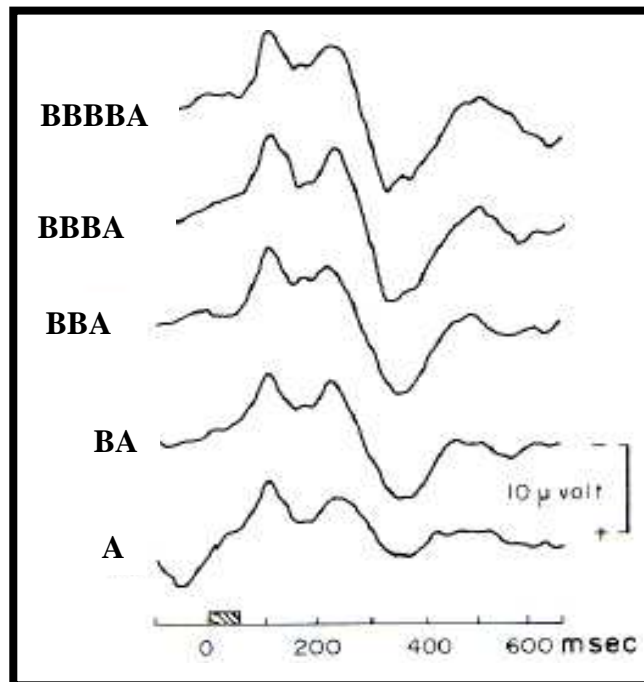
1ères composantes endogènes  
décrites : VCN et P300

### P300 (Sutton et al, 1965, 1967)



❖ Onde positive pariétale, étendue

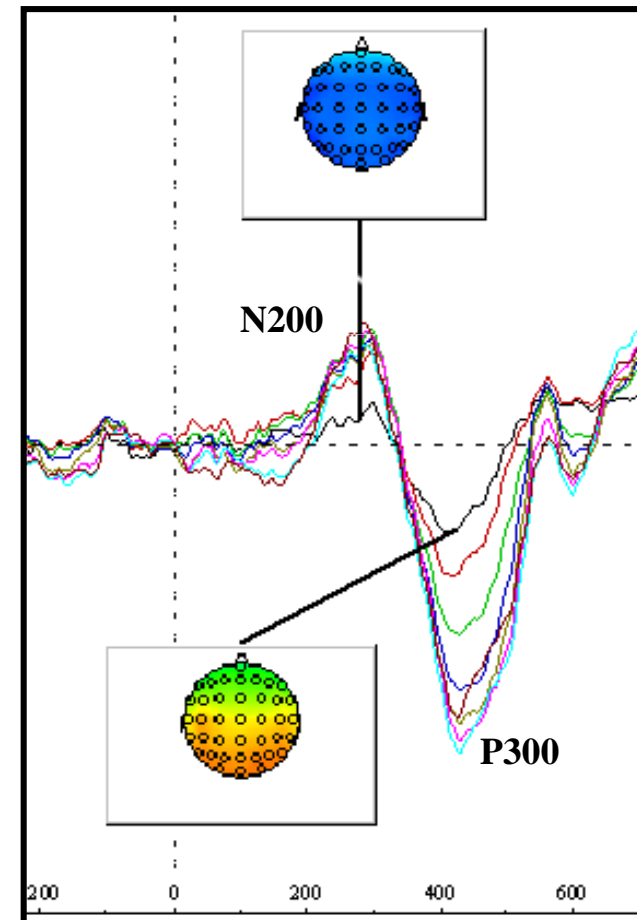
- P300 précoce (P3a), maximum fronto-central
- P300 plus tardive (P3b), maximum centro-pariétal



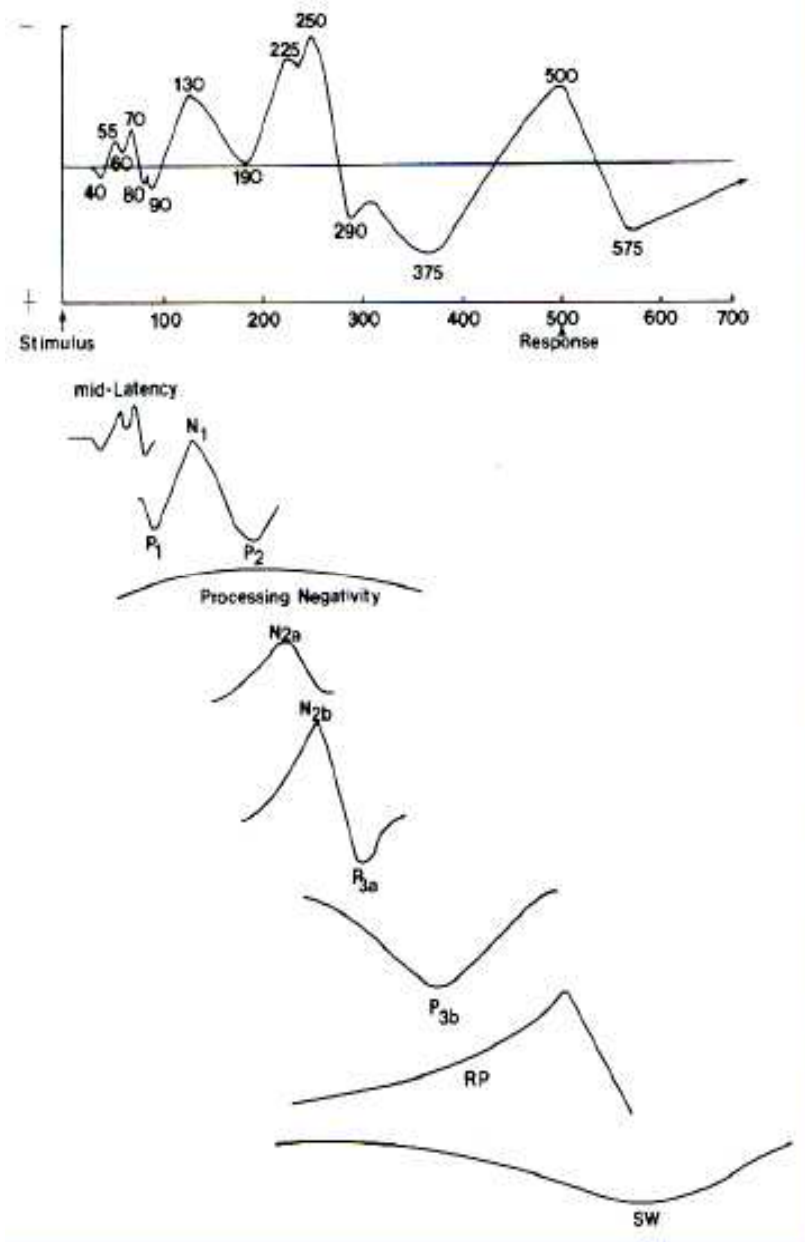
❖ lié à la détection de stimuli non concordants (déviants), absents

← ❖ Amplitude proportionnelle à la probabilité d'occurrence d'un stimulus

❖ lié à la construction du percept

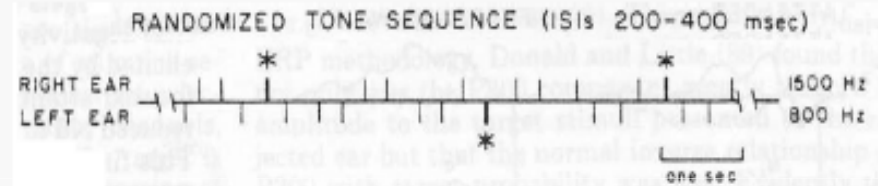


## Composantes tardives (endogènes)



Ensemble d'ondes permettant de segmenter le TR (temps réaction)

### ❖ Mismatch negativity, MMN/N2a

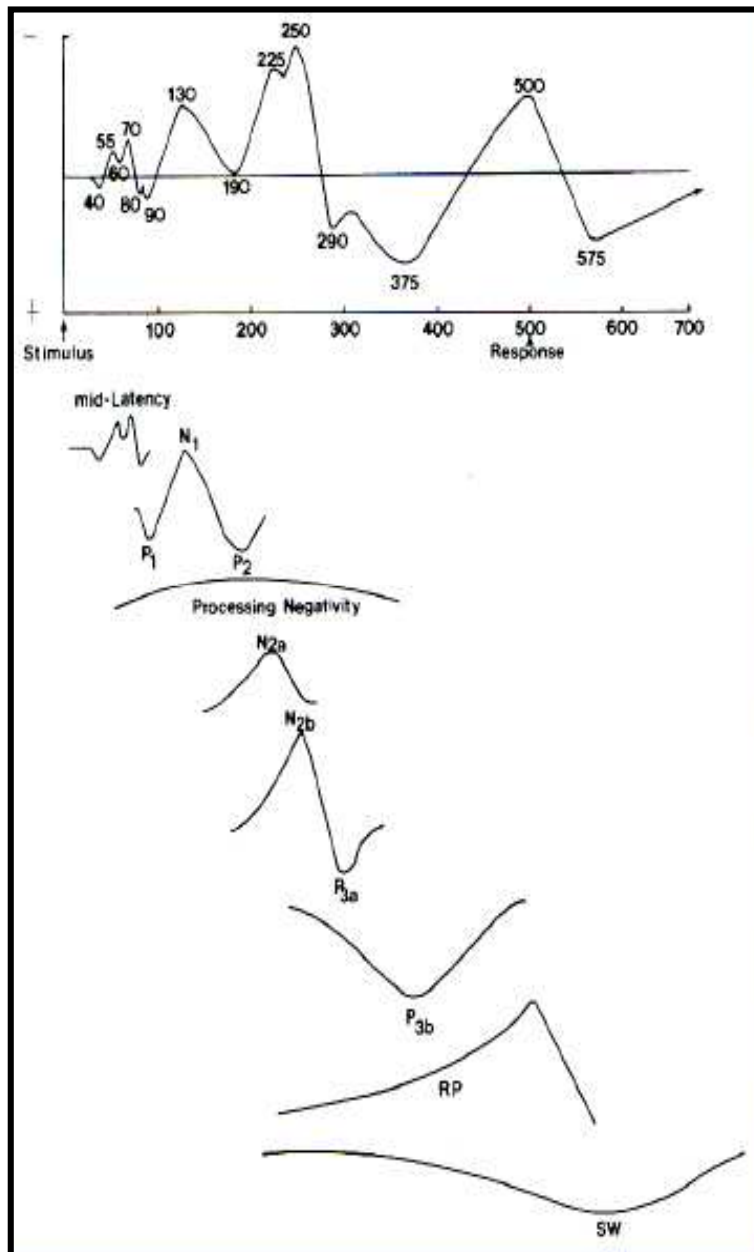


MMN = Deviant (\*, rare) - Standard (frequent)

Détection automatique d'un « mismatch »  
des traces sensorielles

## Composantes tardives (endogènes)

Ensemble d'ondes permettant de segmenter le TR (temps réaction)



- |  |   |   |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ N2b</li> <li>❖ P3a</li> </ul> | } | <p>⇒ Réaction d'orientation vers des stimulus déviants, rares / Processus d'évaluation et de catégorisation</p> |
|--|---|---|
- |   |   |  |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ P3b</li> </ul> | } | <p>⇒ - Processus contrôlés d'évaluation et de catégorisation des stimulus significants dans le contexte de la tâche</p> <p>- Prise de décision</p> <p>- Remise à jour de la mémoire de travail</p> |
|---|---|--|
- ❖ Readiness potential, RP ⇒ **Mouvement**
- ❖ Slow (positive) wave ⇒ **Processus post-décisionnels**
- ❖ N400 ⇒ **Traitement sémantique**

## Composantes tardives (endogènes)

### N400

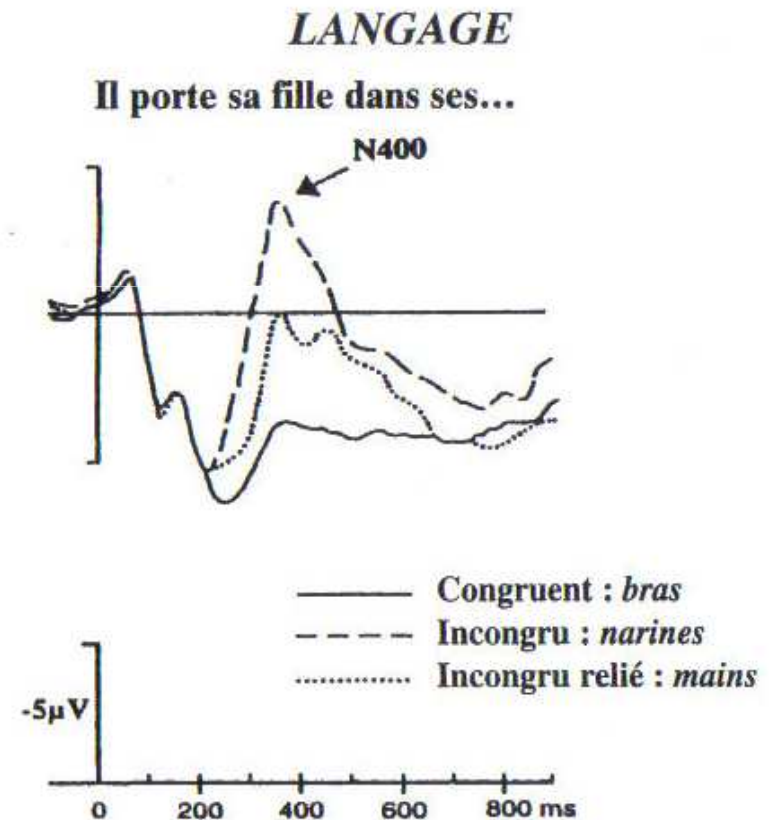
❖ Onde négative maximale en centro-pariétale

❖ Lié à la détection d'un mot inattendu et/ou incongru au sein d'une phrase



Potentiel lié aux seules incongruités sémantiques

❖ Amplitude inversement proportionnelle au degré de prédictibilité d'un mot à partir de son contexte



## Composantes tardives (endogènes)

P600

❖ Onde positive  
maximum en pariétal

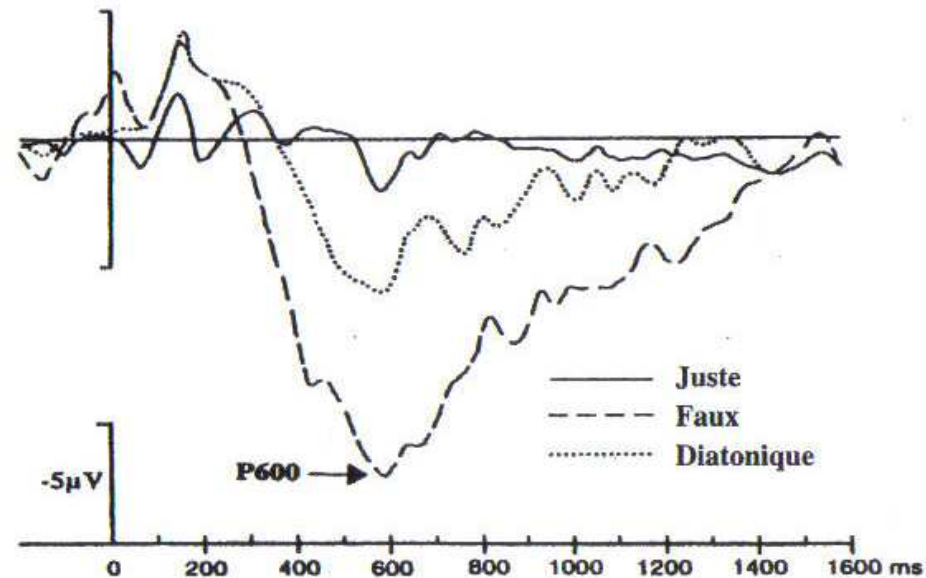
❖ Lié aux discordances  
harmoniques et non  
sémantiques

**MUSIQUE**

Mélodie Familère  
« Toréador » Carmen, G. Bizet



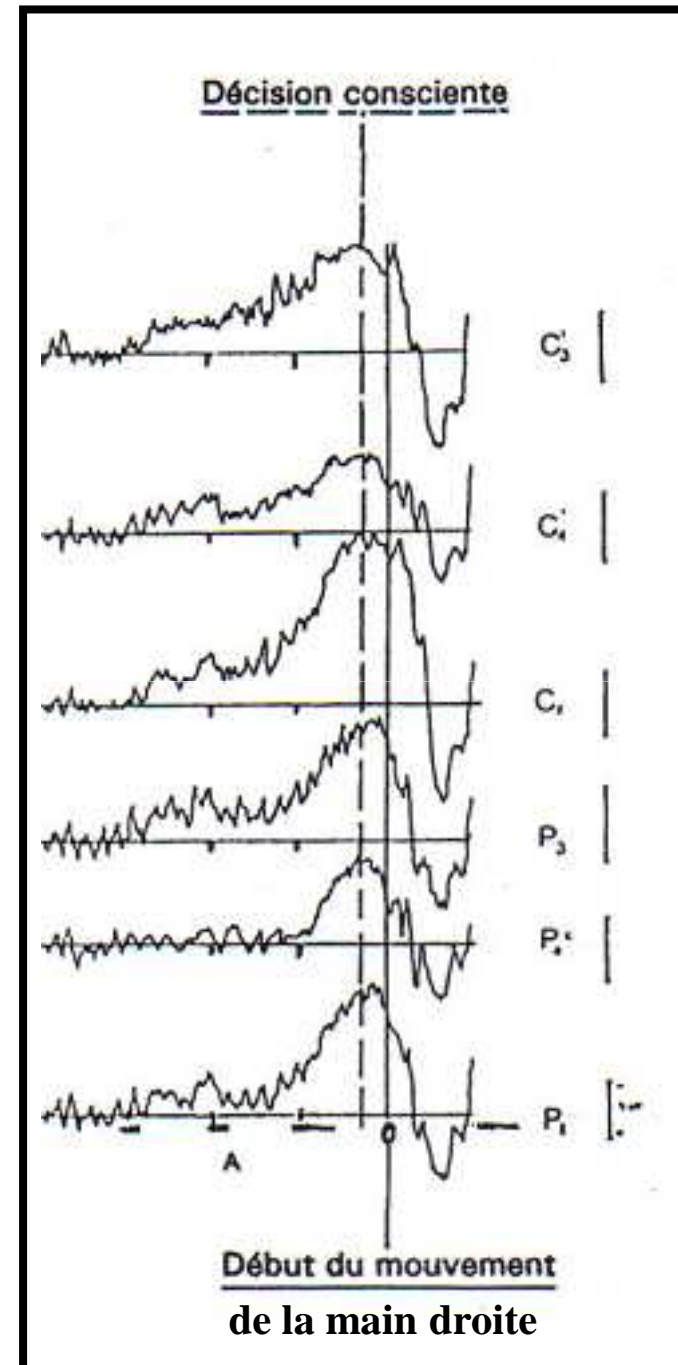
Juste  
Faux  
Diatonique



## Composantes tardives (endogènes)

### POTENTIEL DE PRÉPARATION MOTRICE (ppm) (Kornhuber et al., 1978)

- ❖ Onde négative, maximum centro-pariétale
- ❖ Reflète travail d'élaboration corticale précédant un acte moteur volontaire
- ❖ Apparaît en moyenne 800 msec avant le début de la réalisation effective de l'acte
- ❖ 2 composantes : - précoce (non consciente), (-1500 msec)  
- plus tardive (consciente), (- 400 à - 700 msec)

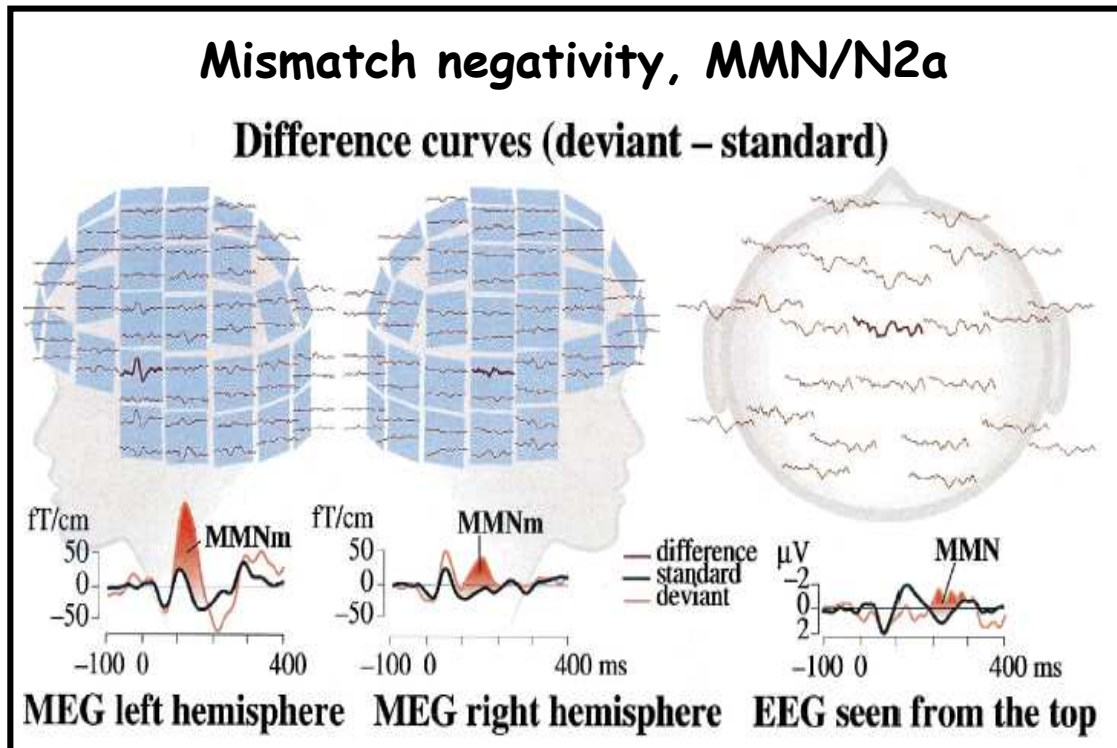


## Champ magnétique évoqué

- ❖ Encore peu d'études sur les concomitants magnétiques des processus cognitifs
- ❖ Similarités et différences entre les potentiels électriques et champ magnétiques évoqués



Complémentarité des données EEG et MEG

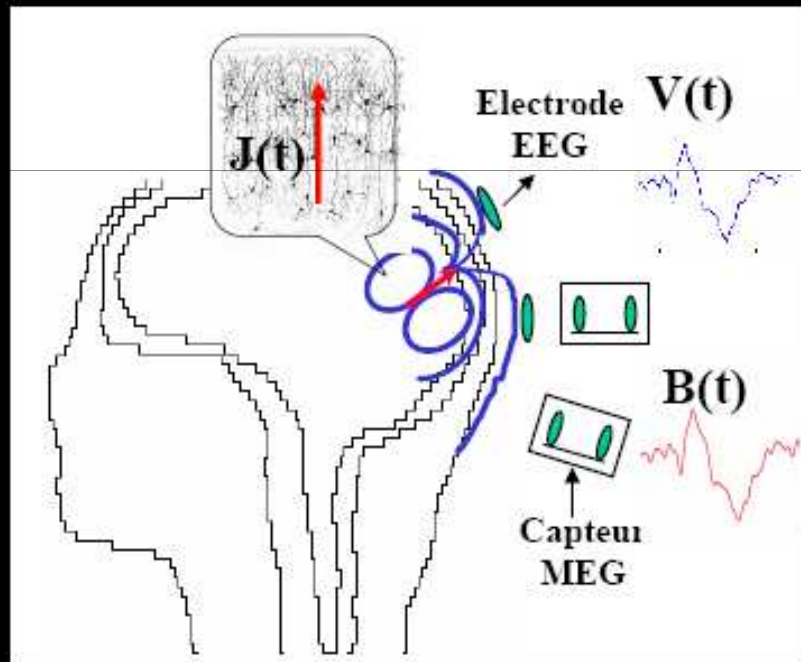


P300  $\neq$  M300

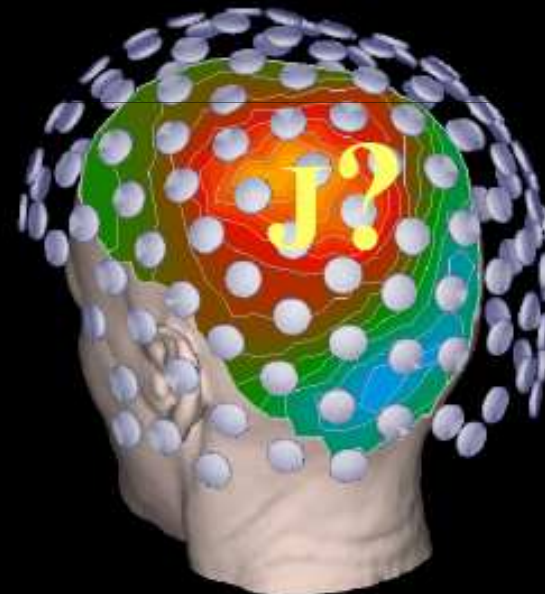
# Localisation des sources

Reconstruire dans le temps et l'espace les sources neuronales à l'origine des signaux MEG et EEG mesurés en surface

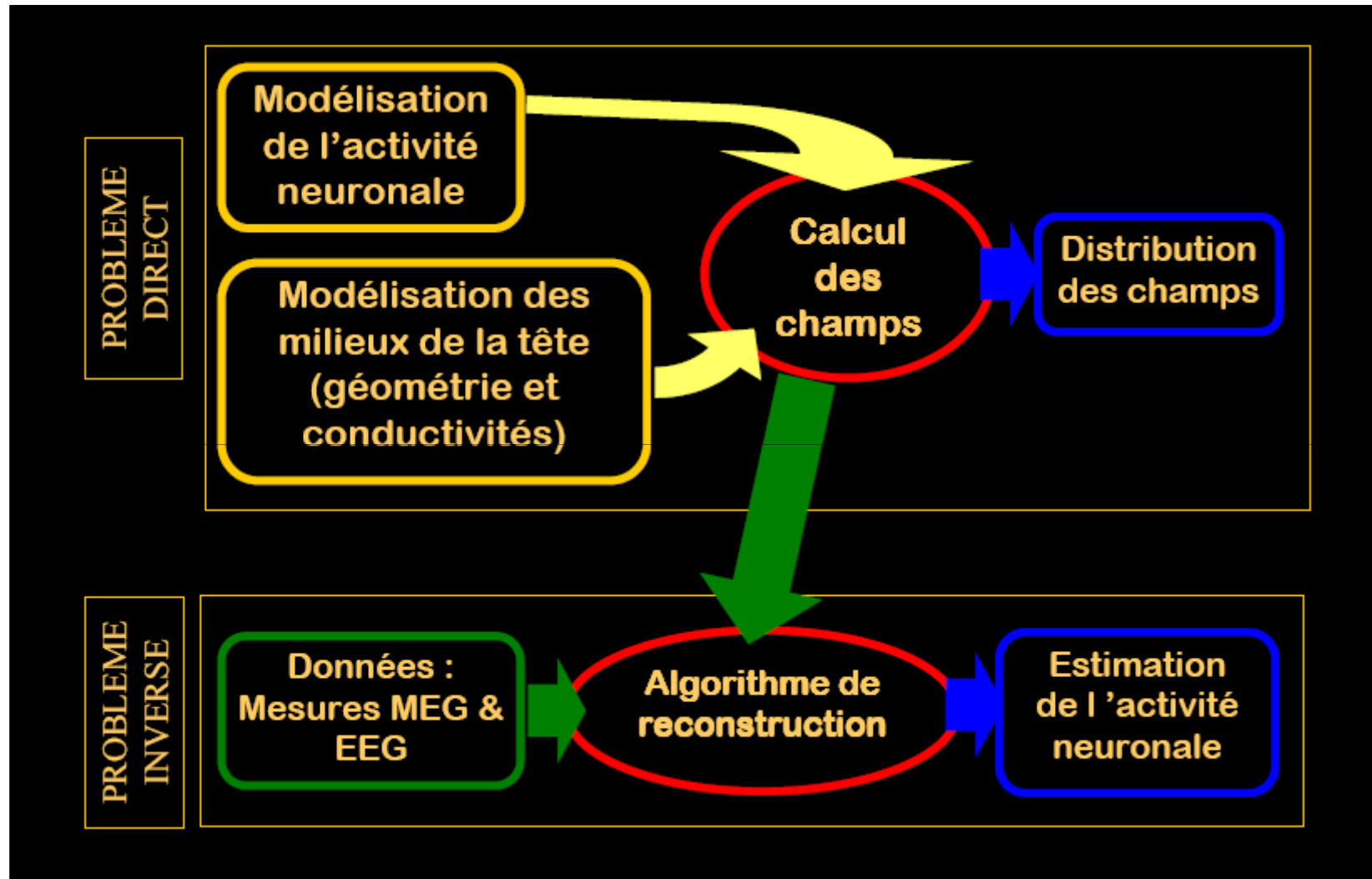
Problème direct



Problème inverse

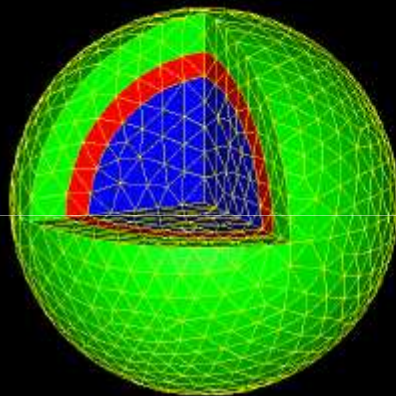


# Localisation des sources



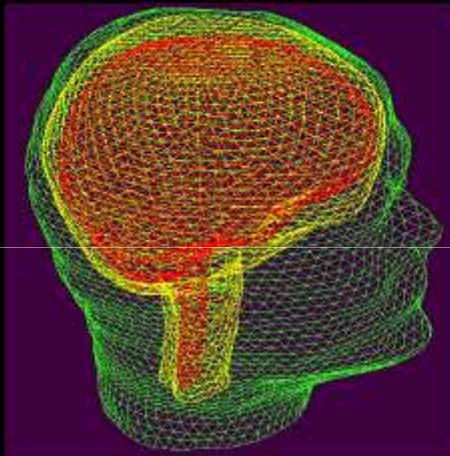
# PROBLEME DIRECT : les modèles de tête

■ **Modèle sphérique**



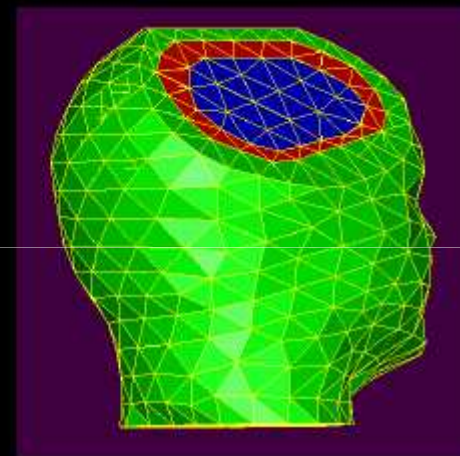
**Calcul analytique de  $B$  et  $V$**   
 **$B$  indépendant des conductivités**  
 **$B$  dépend uniquement du**  
**centre de la sphère**  
**de Munck, 1988]**  
**Sarvas, 1987]**

■ **Modèle réaliste homogène par couches**



**Intégrales de frontière**  
**Milieux isotropes et homogènes**  
**Mallage surfacique**  
**Meijs et al, 1987, 1989]**  
**[Hämäläinen & Sarvas, 1989]**

■ **Modèle réaliste inhomogène**



**Méthode des Eléments Finis**  
**Méthode des Différences finies**  
**inhomogènes ou anisotropes**  
**Mallage volumique**  
**[Marin, 1998]**  
**[Lemieux, 1996]**

## Localisation des sources : Difficultés

### Problème direct :

☹ géométrie complexe du milieu de conduction  
peau, os , LCR, cortex

### Problème inverse :

- ☹ peu de données
- ☹ solution non unique
- ☹ instabilité des solutions au bruit