

---

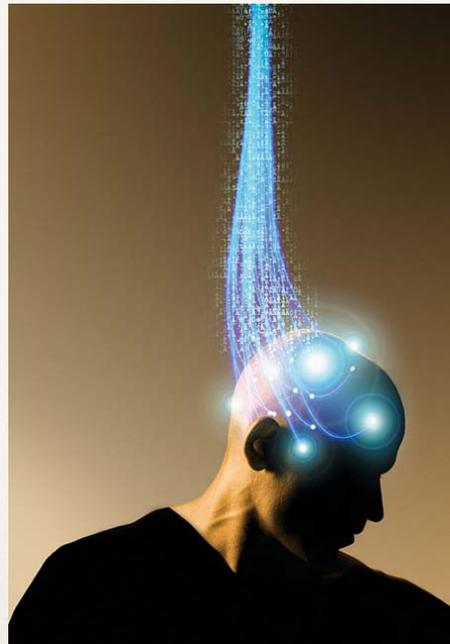
# Interfaces cerveau-machine

# Introduction - plan

---

I. Pourquoi des interfaces cerveau machine (BCI) ?

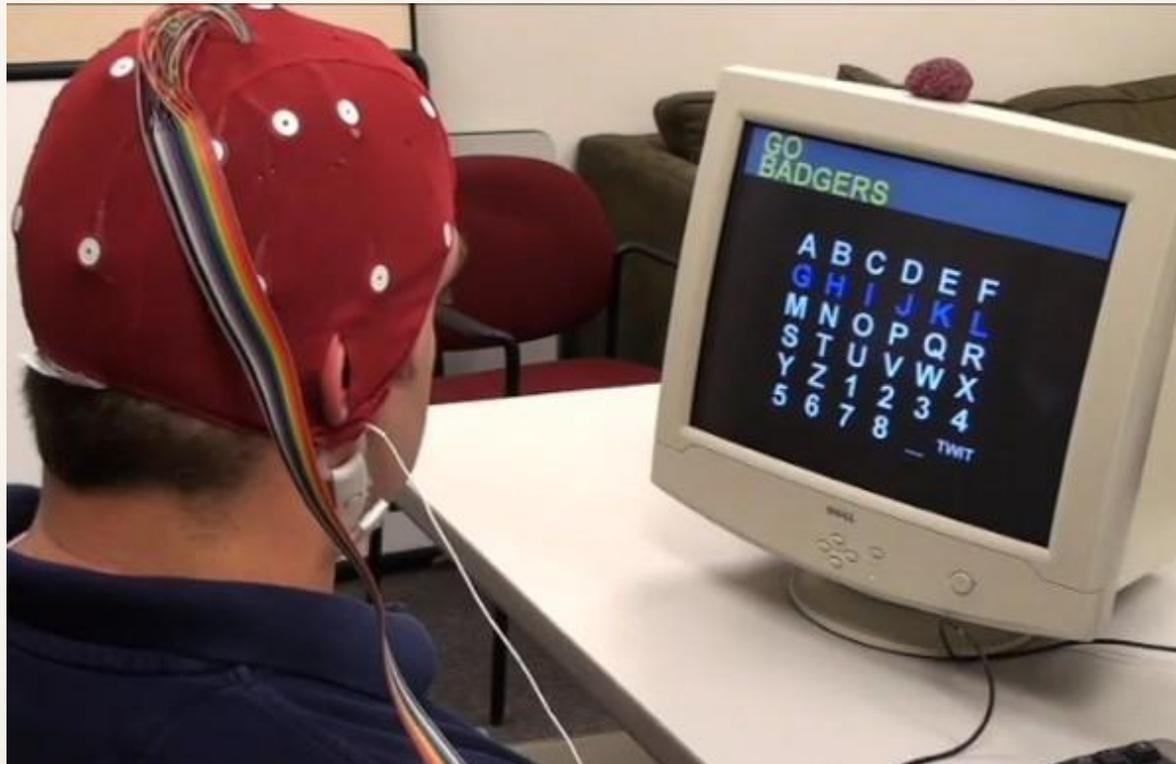
II. La chaîne mise en jeu



# Pourquoi des BCI ?

---

- ❖ Moyen de communication



# Pourquoi des BCI ?

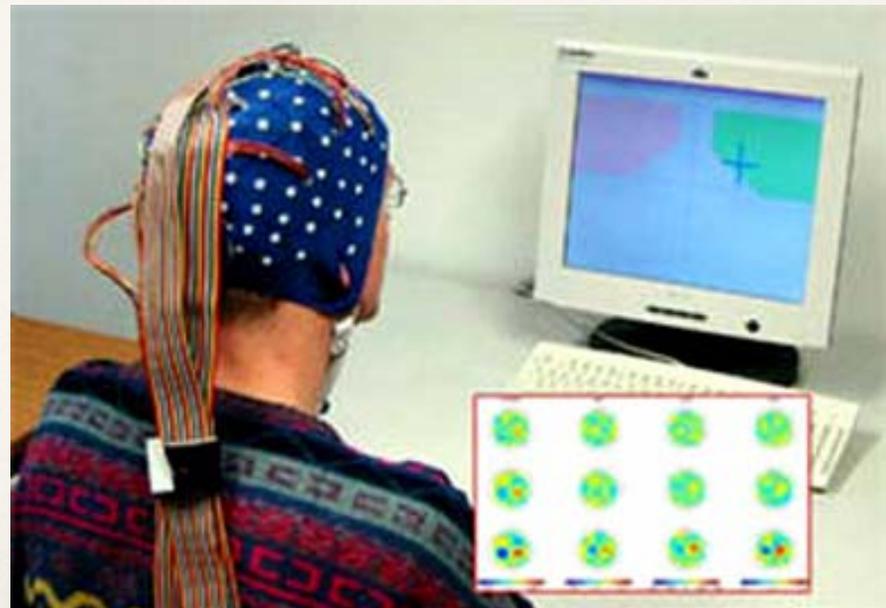
- ❖ Moyen de communication
- ❖ Réhabilitation motrice



# Pourquoi des BCI ?

---

- ❖ Moyen de communication
- ❖ Réhabilitation motrice
- ❖ Rééducation



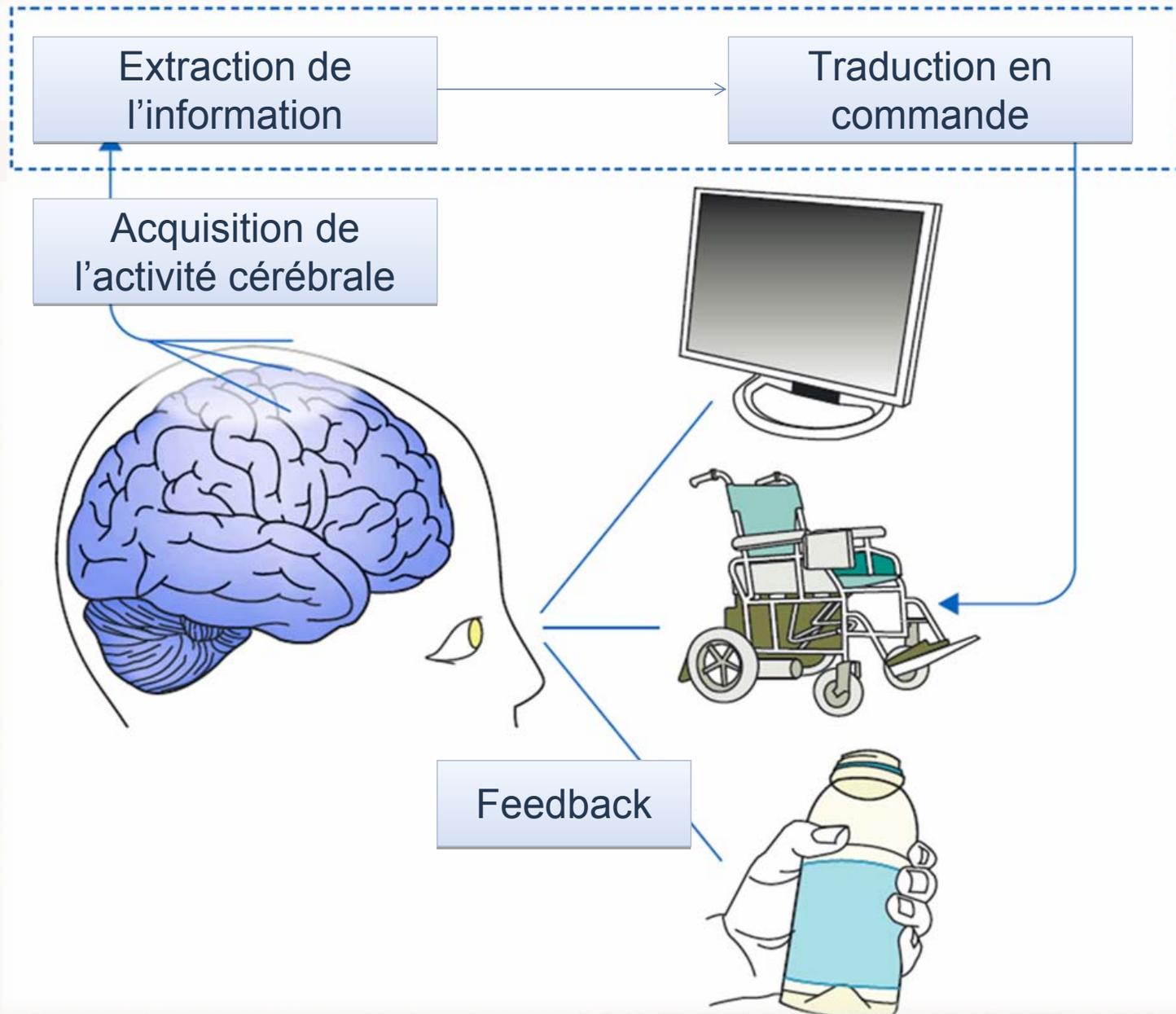
# Pourquoi des BCI ?

---

- ❖ Moyen de communication
- ❖ Réhabilitation motrice
- ❖ (Ré-)éducation
- ❖ Recherche en neurophysiologie



# Dénominateurs communs



# Méthodes d'acquisition

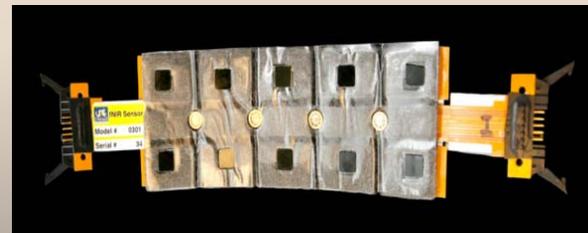
- IRM fonctionnelle



- Tomographie par émission de positrons



- Imagerie proche infrarouge



- Magnétoencéphalogramme (MEG)

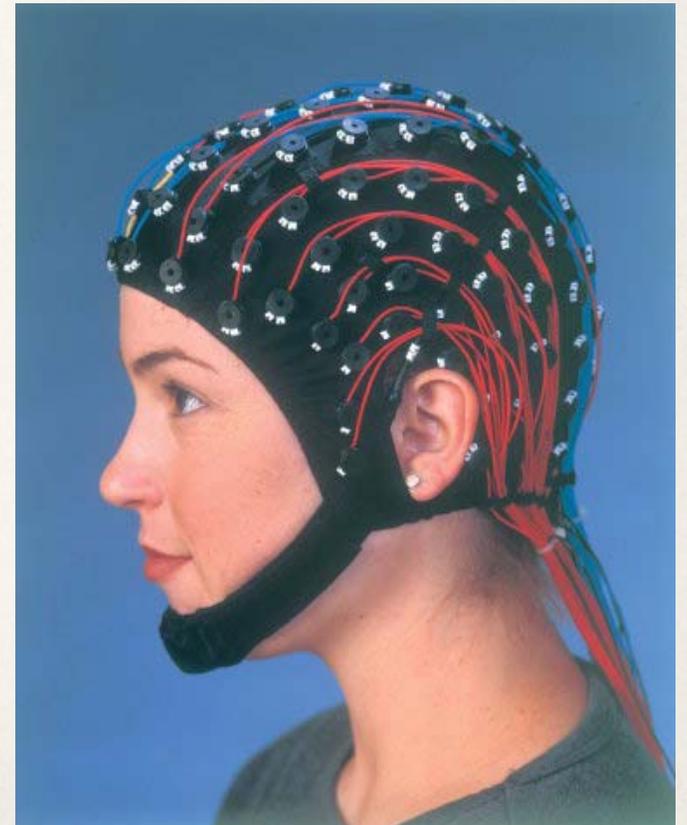


# Méthodes d'acquisition

---

## ❖ Électroencéphalogramme (EEG)

- Méthode non invasive
- Rapide, facile, peu cher
- Perturbations

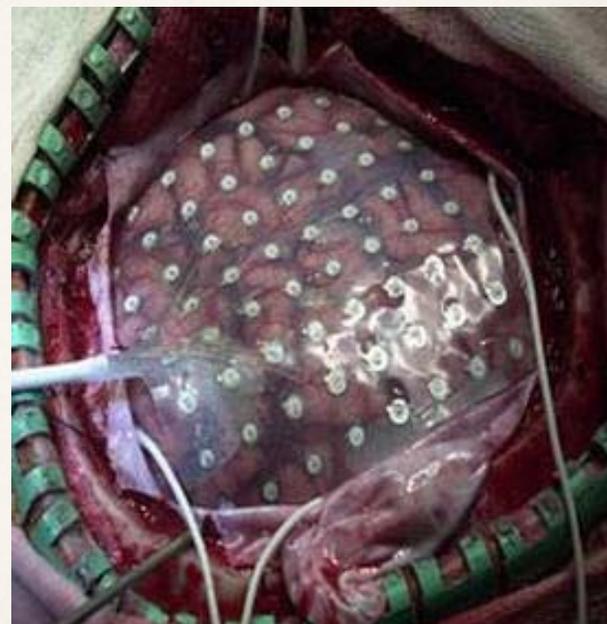


# Méthodes d'acquisition

---

- ❖ Électrocorticographie (ECoG)

- Modérément invasive
- Moins de perturbations
- Plus grande précision

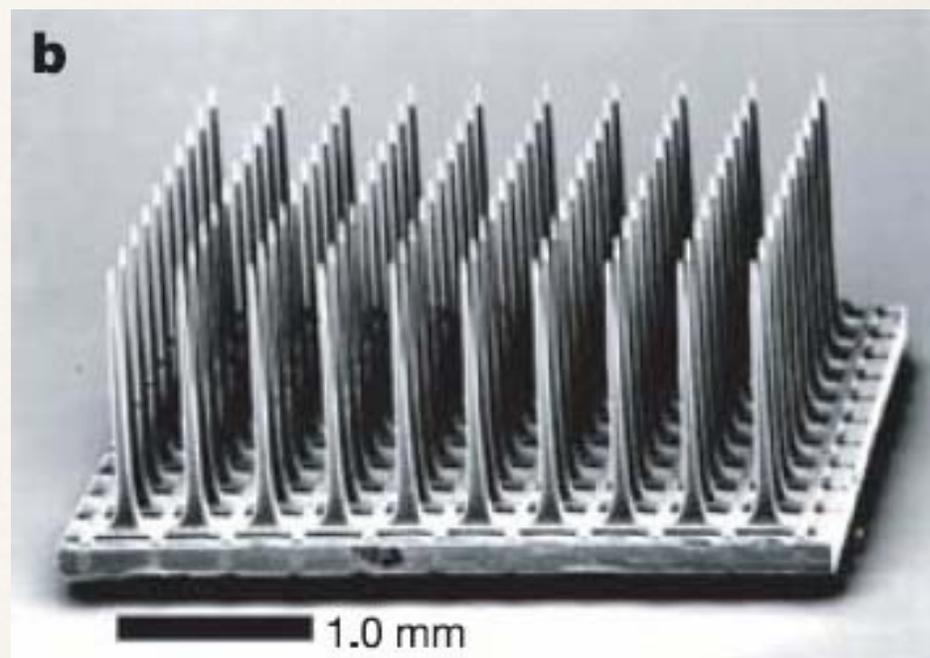


# Méthodes d'acquisition

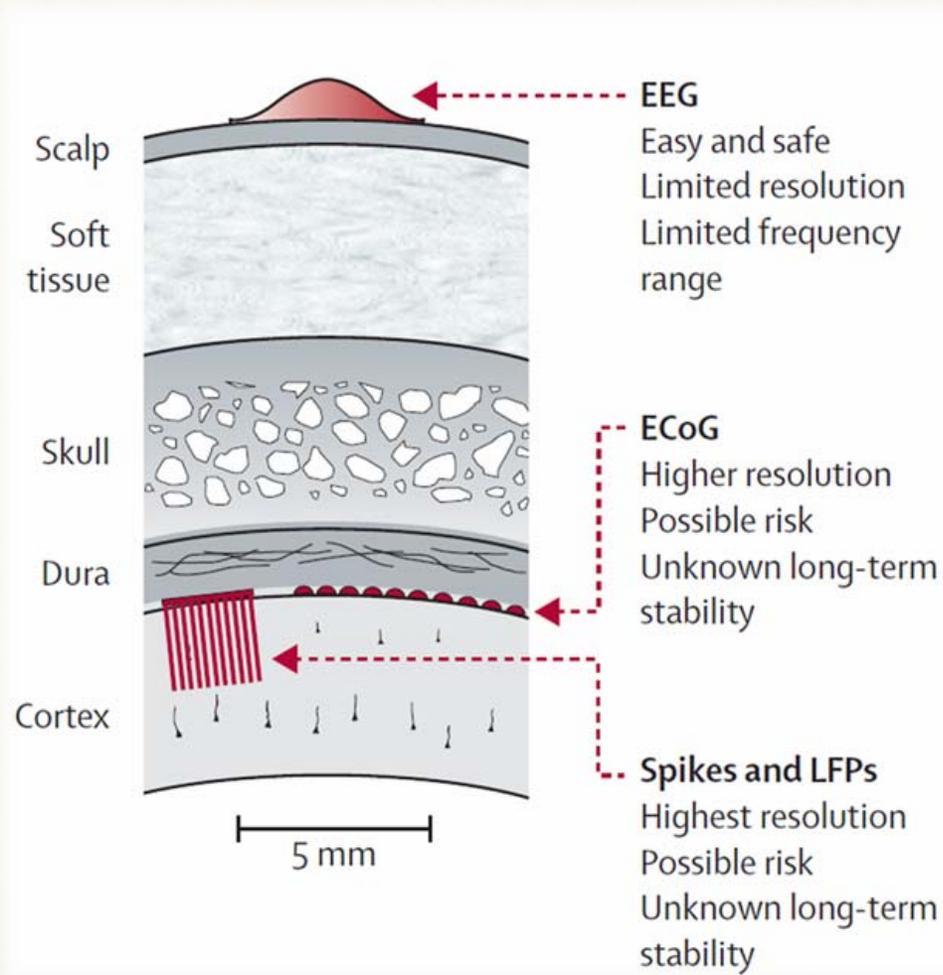
---

## ❖ Acquisition intra-corticale

- Méthode invasive
- Accès aux potentiels d'action et champs locaux

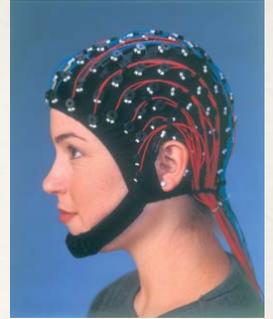


# Méthodes d'acquisition



# Extraction de l'information

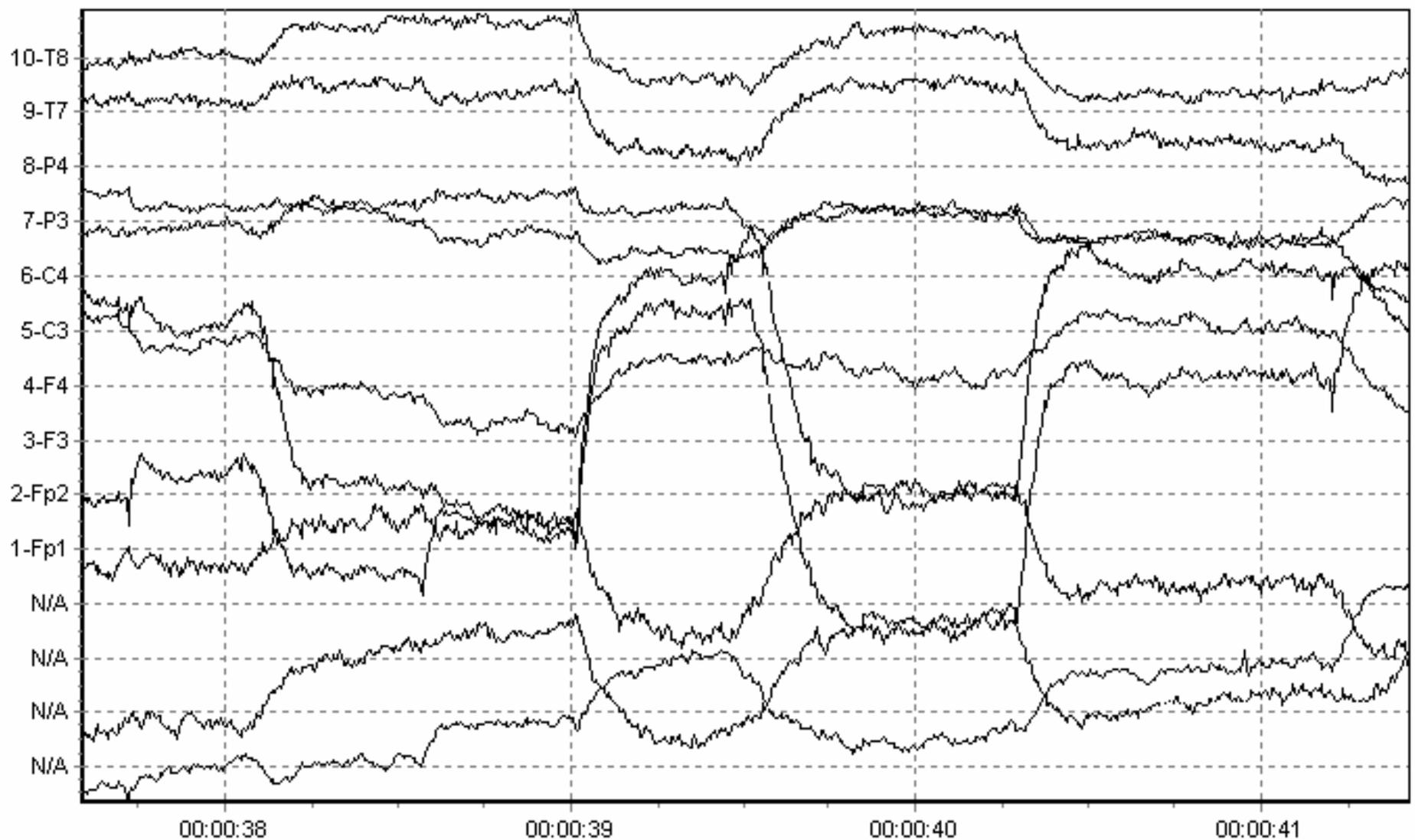
---



❖ Avec un électroencéphalogramme :

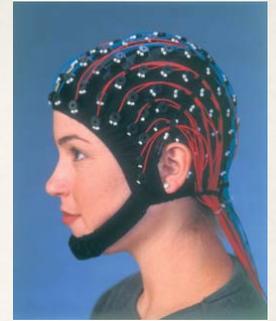
1- Problèmes de bruit :

- Secteur (50Hz)
- Muscles (mâchoire, œil)
- Frottement paupière rétine
- Impulsions cardiaques



Electroencéphalogramme : Bruit électrique correspondant à un clignement d'œil

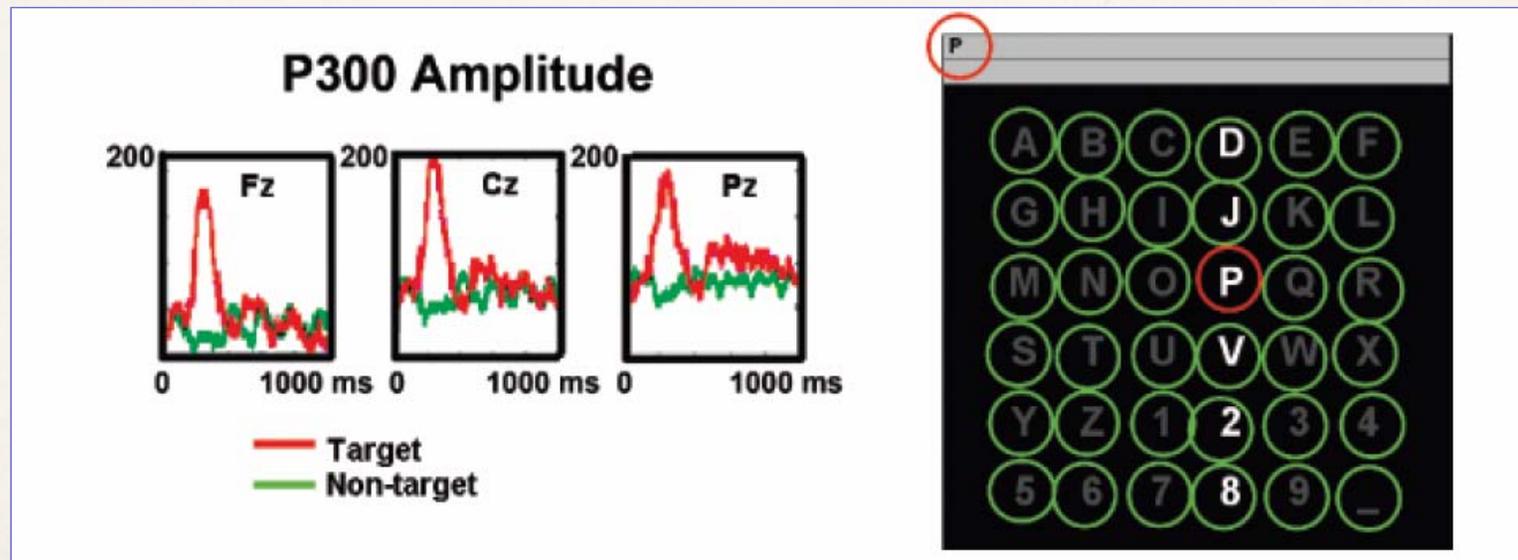
# Extraction de l'information



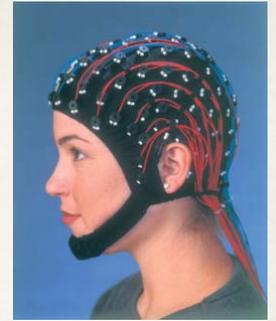
❖ Avec un électroencéphalogramme :

2. Choix d'un marqueur physiologique :

- potentiel évoqué (ex « P300 ») :



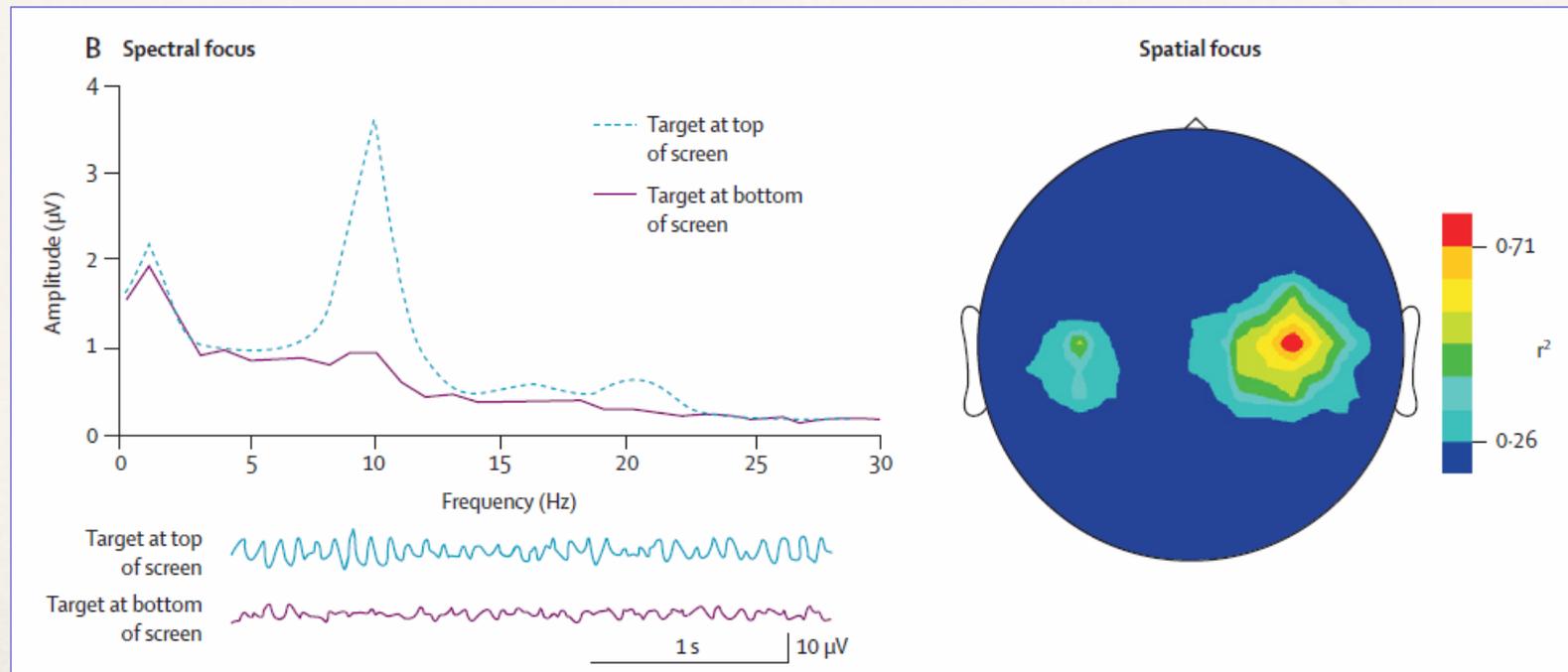
# Extraction de l'information



❖ Avec un électroencéphalogramme :

2. Choix d'un marqueur physiologique :

- Oscillations  $\beta$  (18-26Hz) et  $\mu$  (8-12Hz)



# Extraction de l'information



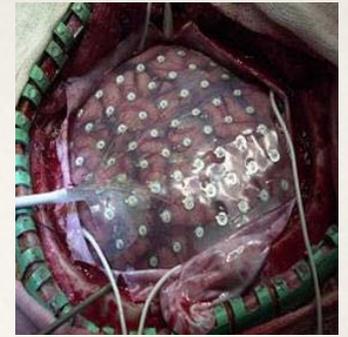
❖ Avec un électroencéphalogramme :

2. Choix d'un marqueur physiologique :

- Slow cortical potentials (SCP)



# Extraction de l'information



❖ Avec un électrocorticogramme :

1. Affranchissement des autres signaux bioélectriques
2. Mêmes marqueurs physiologiques avec cependant :

Meilleure résolution temporelle

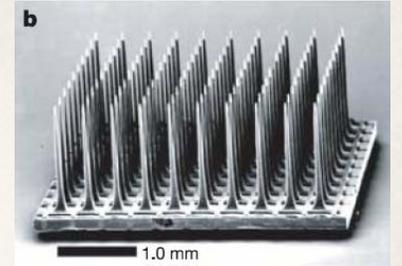
-> accès aux oscillations  $\gamma$  (30-200Hz)

Meilleure précision spatiale :

-> vision plus nette et apprentissage très rapide

# Extraction de l'information

---



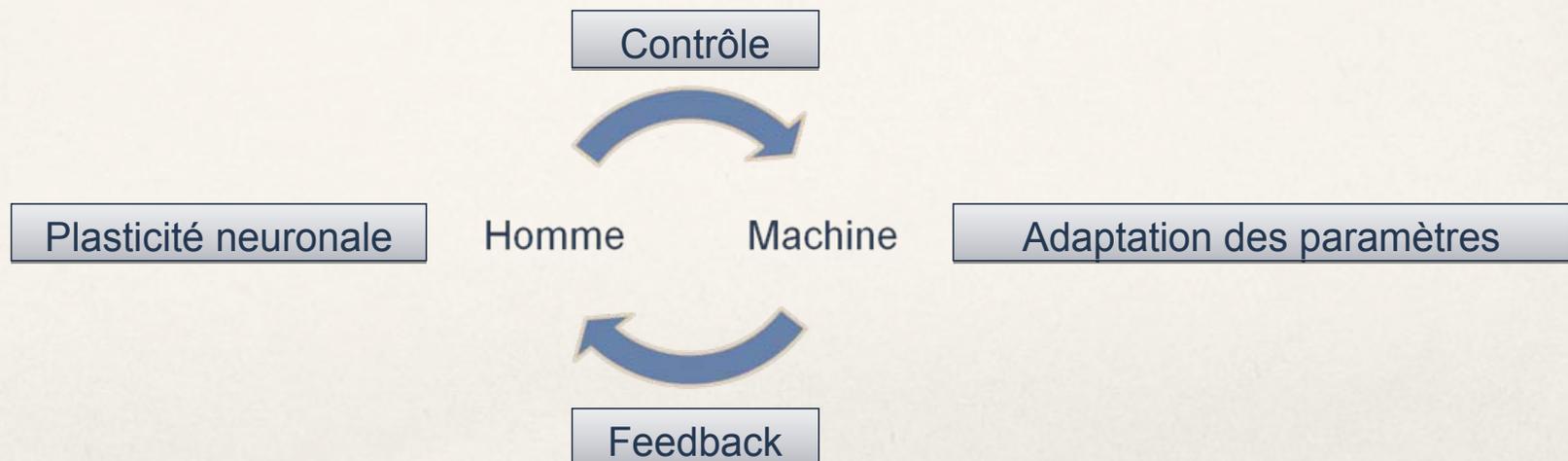
- ❖ Avec des implants intra corticaux :
  - Peu encore étudié chez l'homme (trop risqué)
  - Observation indépendante possible de potentiels d'action

# Feedback - adaptation

---

L'optimisation d'une interface homme machine nécessite :

- ❖ Un calibrage préliminaire de l'algorithme d'extraction des signaux
- ❖ Un contrôle des signaux amélioré par le sujet par apprentissage
- ❖ Une optimisation dynamique des paramètres de l'algorithme





# «Principles of neural ensemble physiology underlying the operation of brain-machine interfaces»

---



Miguel A. L. Nicolelis & Mikhail A. Lebedev

Juillet 2009

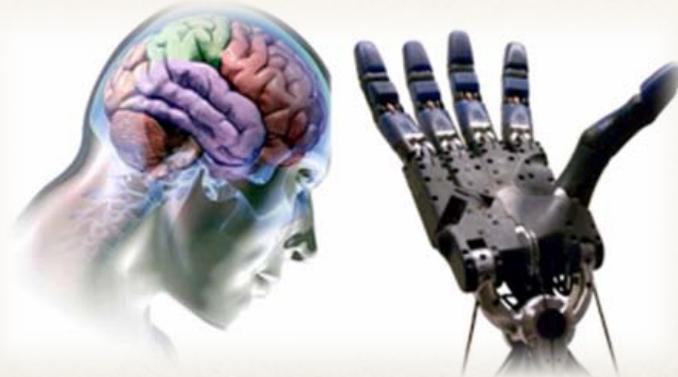
# BMI & Principes physiologiques

---

- ❖ 1950 : Premiers enregistrements d'activités de neurones isolés.
- ❖ 1980 : Importance des ensembles de neurones en neurophysiologie.

But des recherches :

- ❖ Enregistrer l'activité d'une partie intacte du système nerveux.
- ❖ Permettre le contrôle de membres artificiels.



➔ Réhabilitation de patients présentant des handicaps moteurs

# BMI & Principes physiologiques

---

Développement d'interfaces cerveau-machine



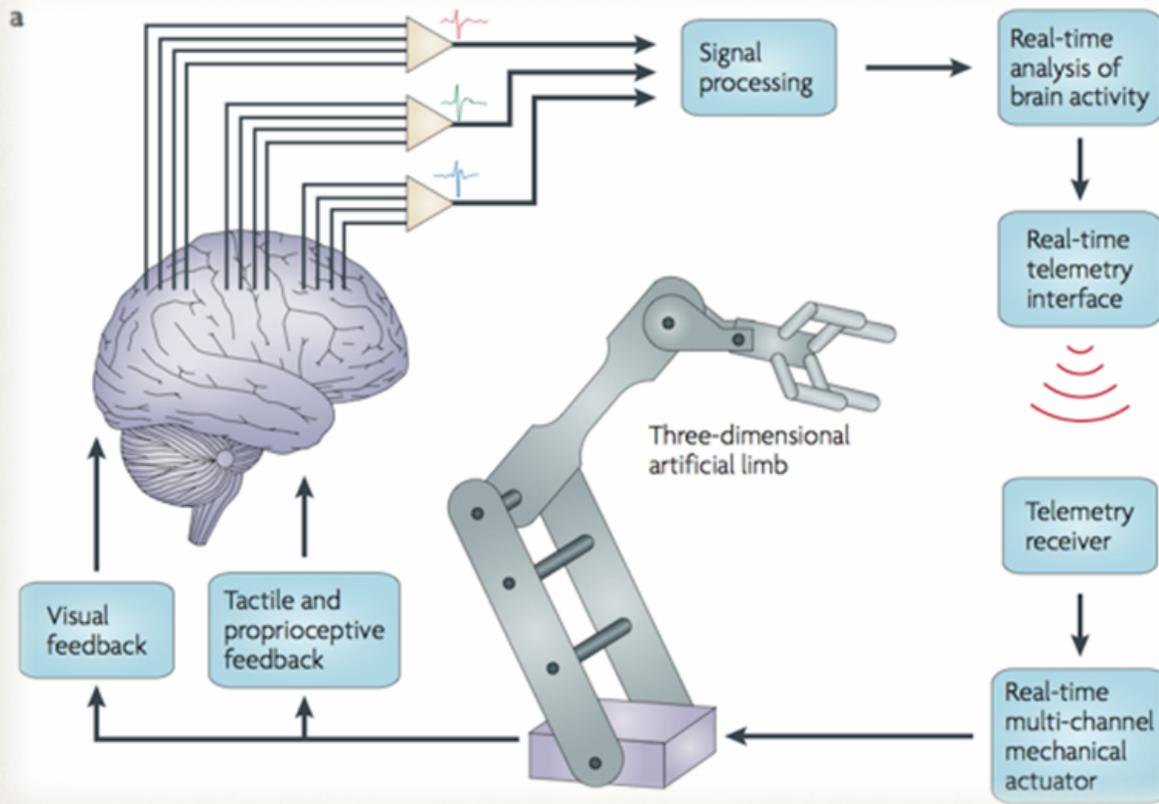
Compréhension de principes physiologiques fondamentaux

# Structure de la présentation :

---

- ❖ L'interface BCI utilisé.
- ❖ Les principaux principes physiologiques.
- ❖ L'importance de la plasticité neuronale.
- ❖ Le contrôle par micro-stimulations et les interfaces «cerveau-machine-cerveau».

# Structure de l'interface BCI



Modèles de calcul réalisés en amont

Enregistrement de l'activité neuronale.



Prédiction des paramètres moteurs (précision ?)



Mouvement



Répercussion

# Principes physiologiques principaux

---

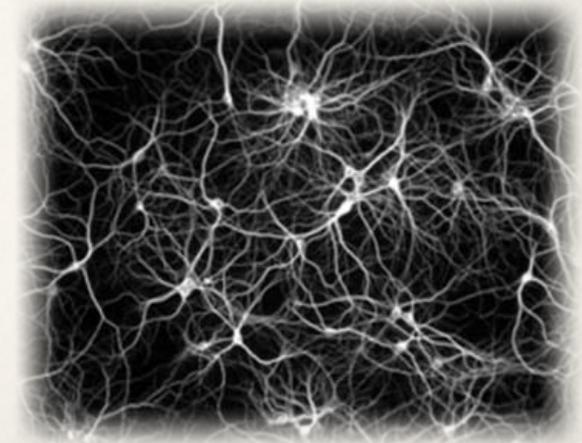
Mis en évidence lors des études sur les BCI :

Zones affectées par les informations  
codant les mouvements :

- ❖ Cortex prémoteur dorsal (PMd)
- ❖ Cortex moteur primaire (M1)
- ❖ Cortex somatosensoriel (S1)
- ❖ Cortex pariétal (PP)
- ❖ Aire motrice supplémentaire (SMA)

Liens entre :

- ❖ Activité neuronale singulière
- ❖ Activité des ensembles neuronaux



# Principes physiologiques principaux

---

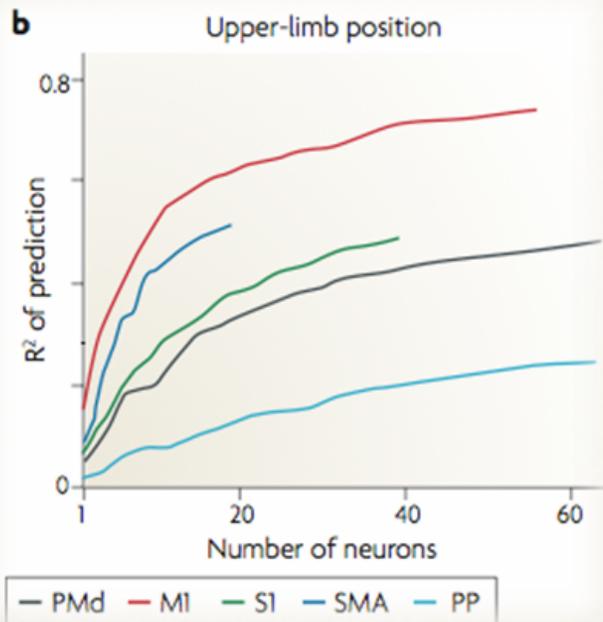
Neurone singulier VS assemblée de neurones

- ❖ Chaque neurone est «multi-tâche»
- ❖ Le neurone seul est insuffisant pour établir des prédictions valides
- ❖ Un niveau de précision voulu  $\square$  un nombre minimal de neurones

➔ Quelle échelle considérer ?

# Principes physiologiques principaux

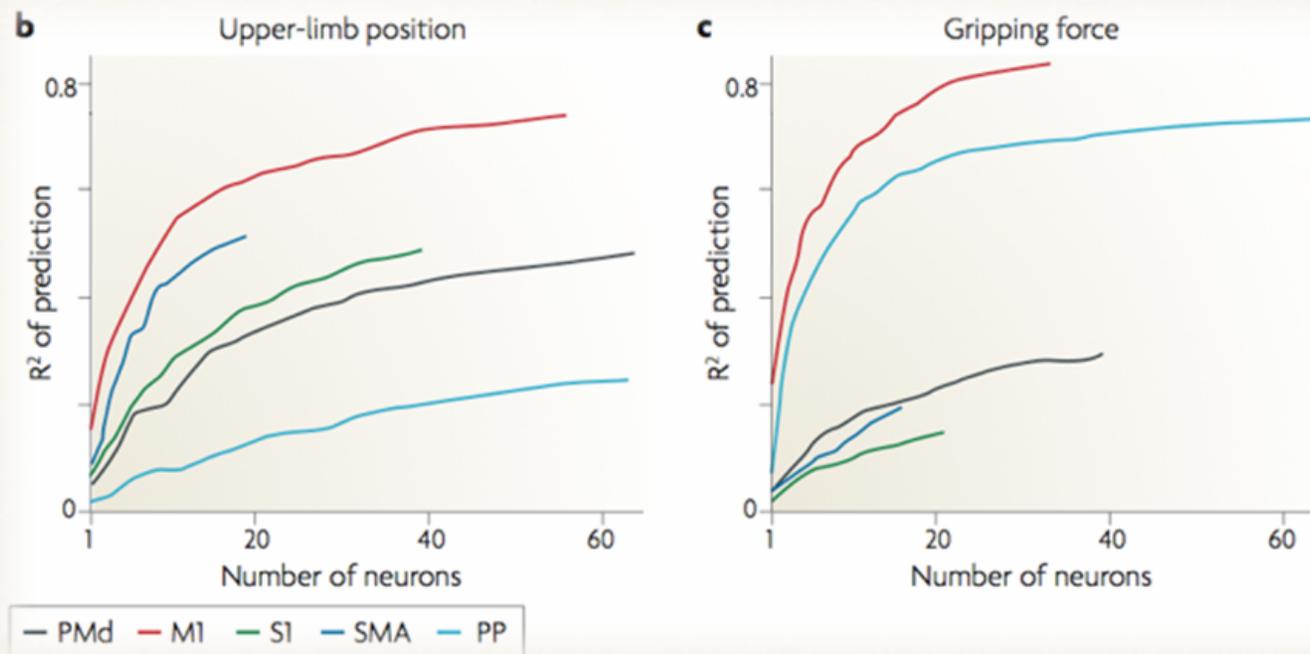
Etude de la précision des prédictions :



- ❖ Enregistrements dans différentes zones
- ❖ Décroissance du nombre de neurones considérés
  - ➔ Validation du principe «d'effet de masse»
- Mais :
- ❖ Aucune certitude absolue
- ❖ Etude valable uniquement pour un mouvement

# Principes physiologiques principaux

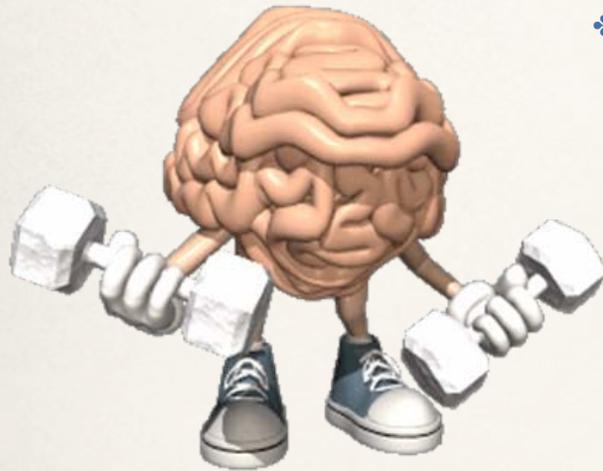
Etude de la précision des prédictions :



# L'importance de la plasticité neuronale

---

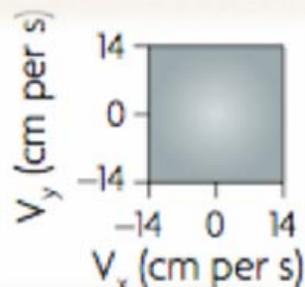
= Capacité des neurones à s'adapter à de nouvelles situations



- ❖ Indispensable pour apprendre à se servir d'un BCI

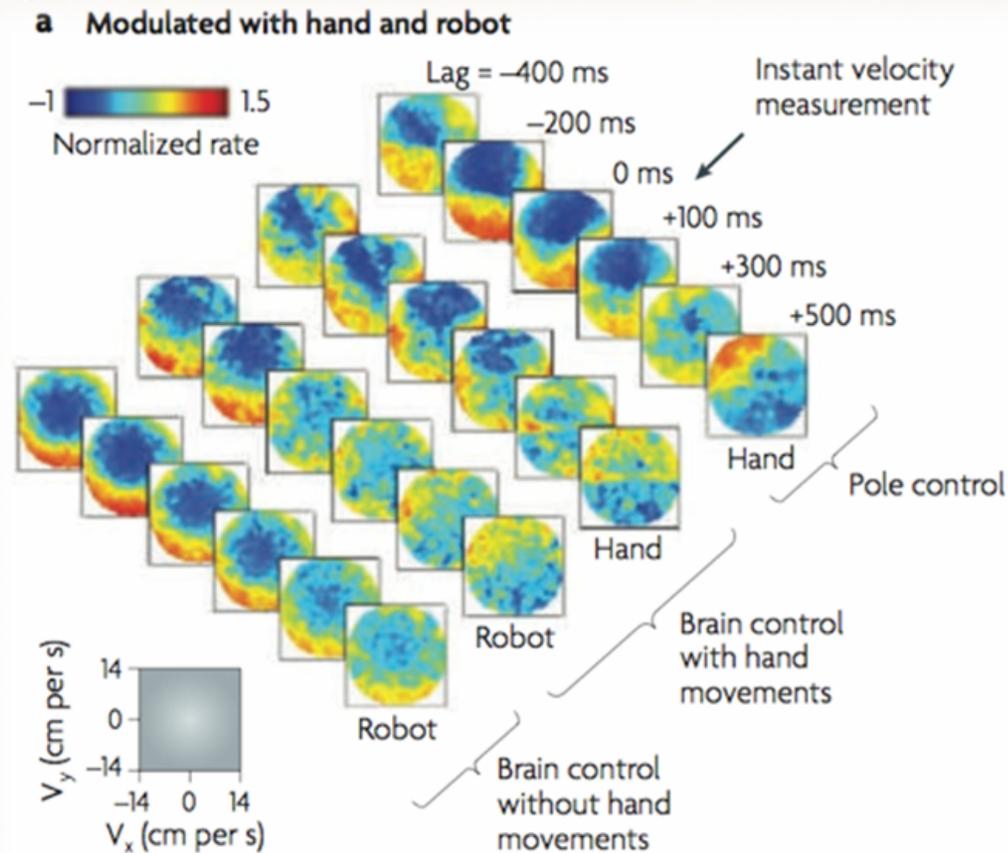
Expérience mise en oeuvre chez le singe :

- ❖ Manipulation d'un robot à l'aide d'un levier
- ❖ Manipulation BCI en effectuant les mouvements
- ❖ Manipulation BCI sans mouvements



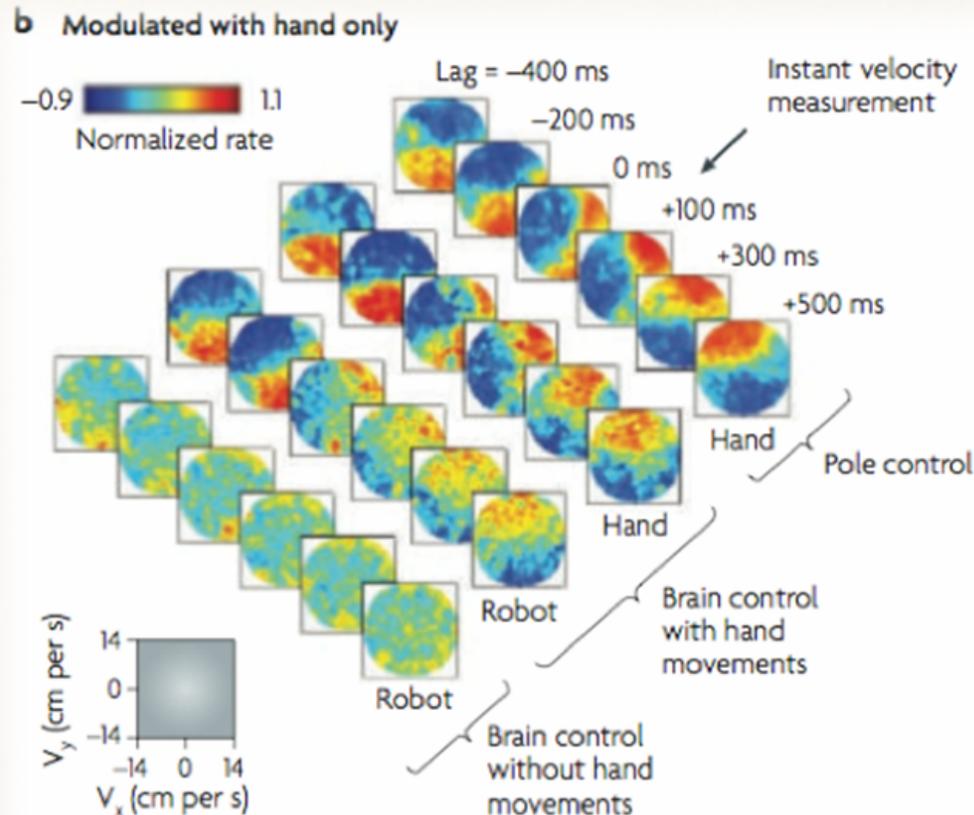
# L'importance de la plasticité neuronale

Résultats différents pour chaque neurones :



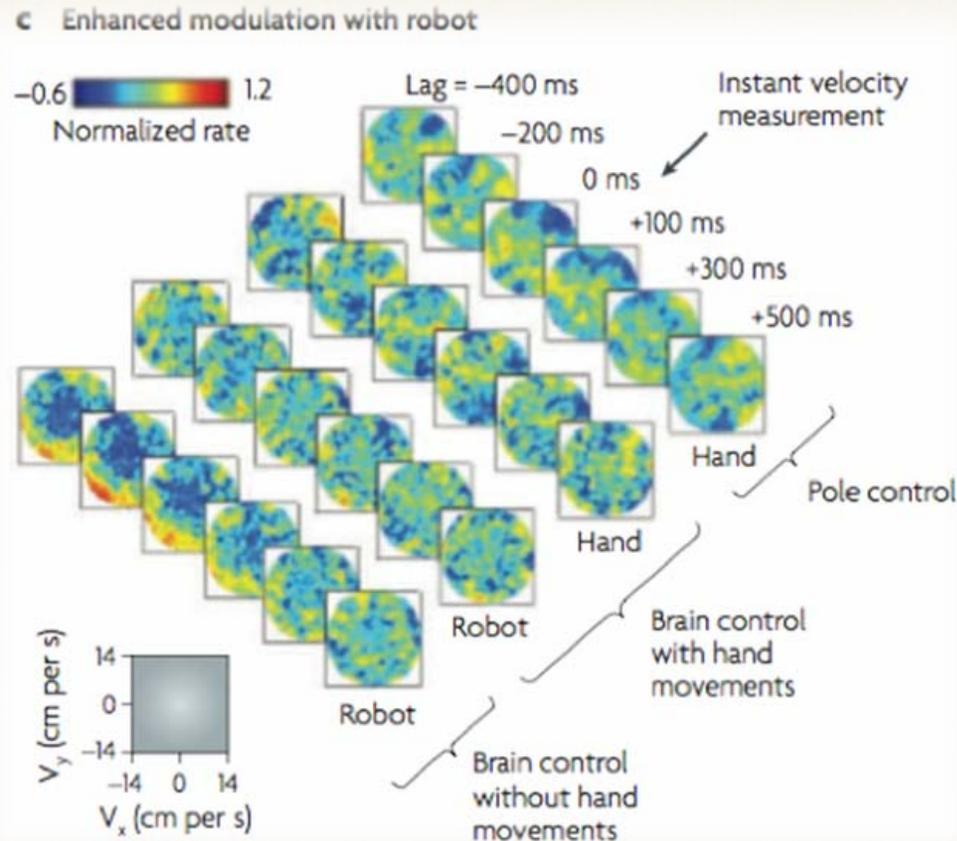
# L'importance de la plasticité neuronale

Résultats différents pour chaque neurones :



# L'importance de la plasticité neuronale

Résultats différents pour chaque neurones :



# L'importance de la plasticité neuronale

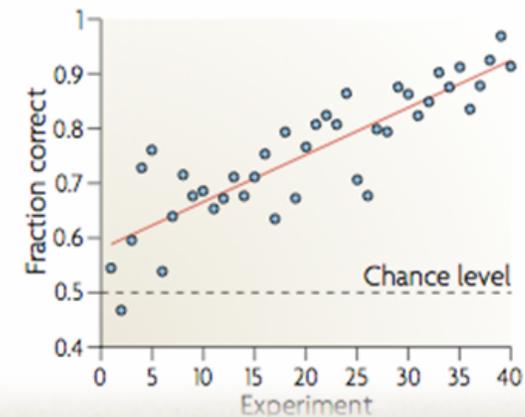
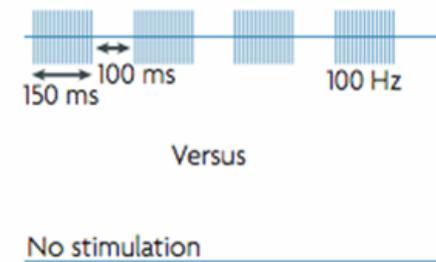
## Le contrôle par «micro-stimulations»

Une autre expérience :

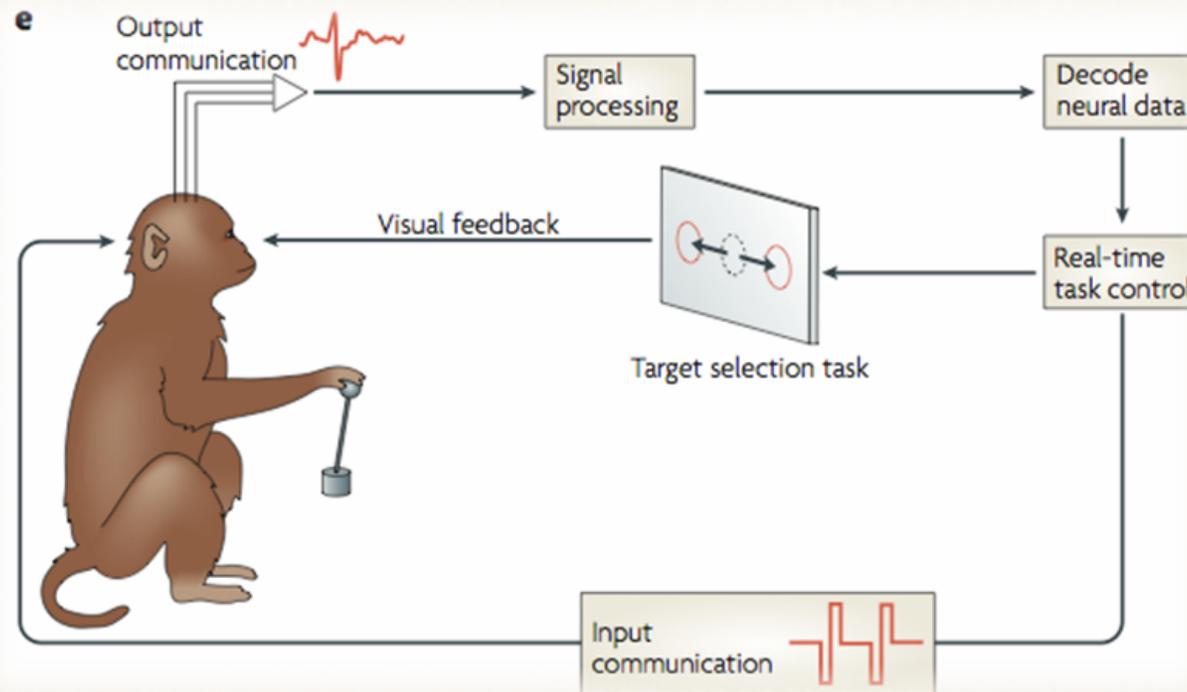
Adaptation à la reconnaissance de  
micro-stimulations

➔ Bonnes capacités d'apprentissage

a Basic amplitude discrimination task



# Nouveau paradigme : les BMBI



Principe d'un interface cerveau-machine mais :

- ❖ Les instructions de mouvement sont transmises au singe par micro-stimulations !

# Conclusion : des applications possibles ?

---

Dix ans de recherches actives sur les MBI



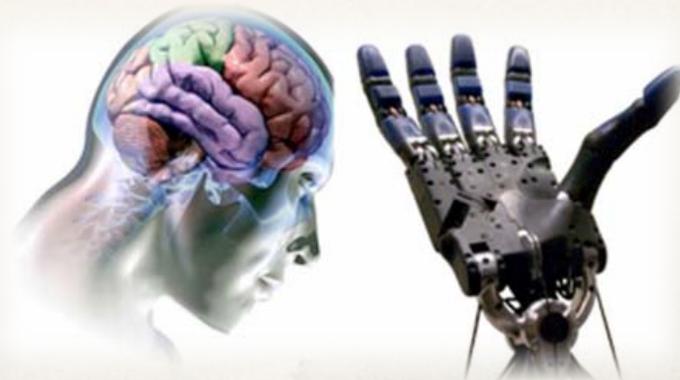
Connaissances sur la physiologie et les ensembles neuronaux

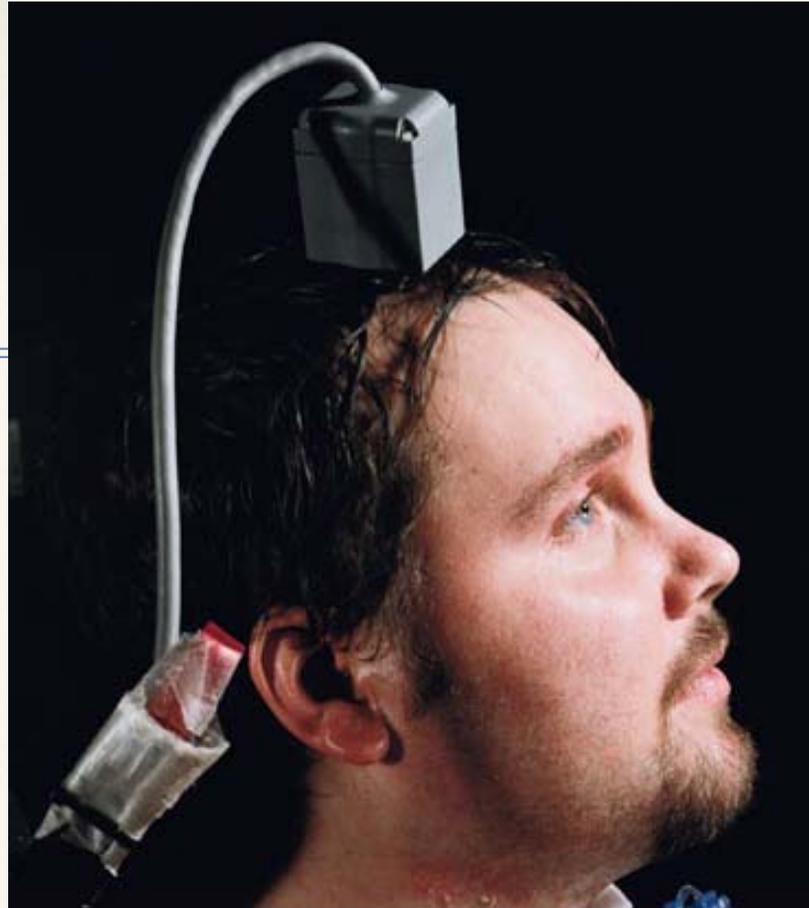
---

Autres domaines d'études sur les BCI



Perspectives de soins pour patients paralysés





# Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia

Article by L. Hochberg - 2006

# Enjeux



- ❖ *Prothèse neuromotrice* : remplacer des fonctions motrices ou sensorielles perdues par une interface extérieure.
- ❖ Nécessité d'avoir des capacités cérébrales fonctionnelles

# Historique

---

- Historique:

- 1978 : premier implant dans le cortex visuel



- 2003 : essais humains par EEG ( Kennedy )

- 2004 : essais humains par implantation d'électrodes

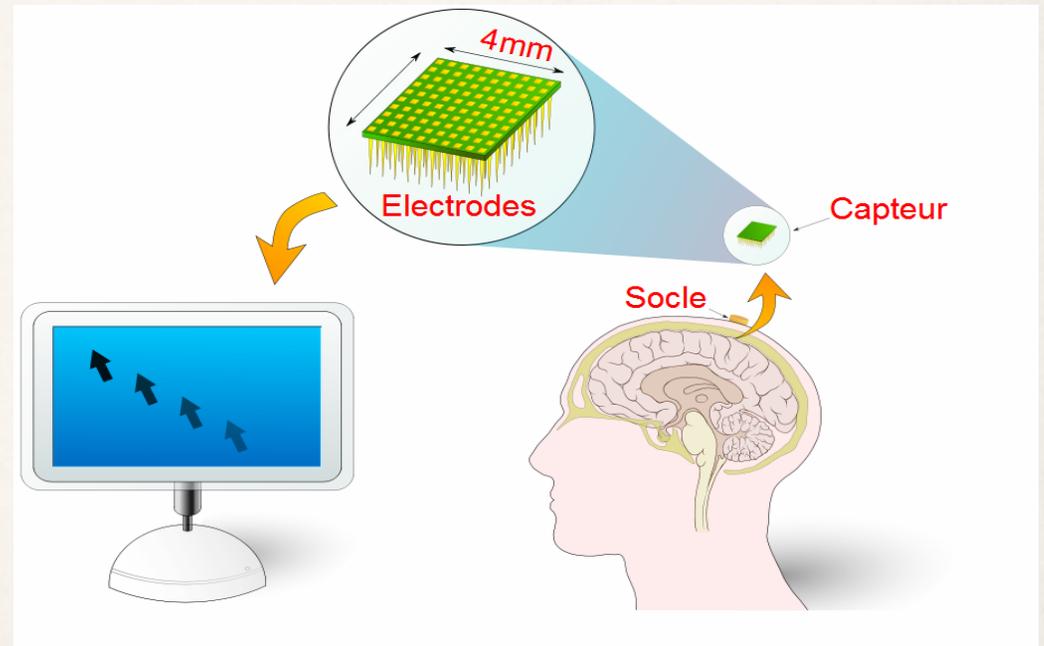
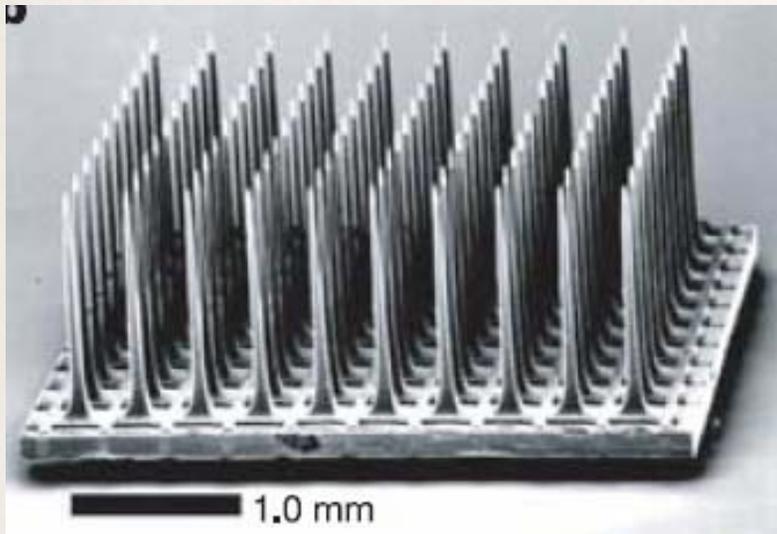
- 2005 : premier bras mécanique contrôlé par Matthew Nagle



# Le principe

*Principe fondamental* : utiliser les fonctions motrices neuronales pour contrôler une machine

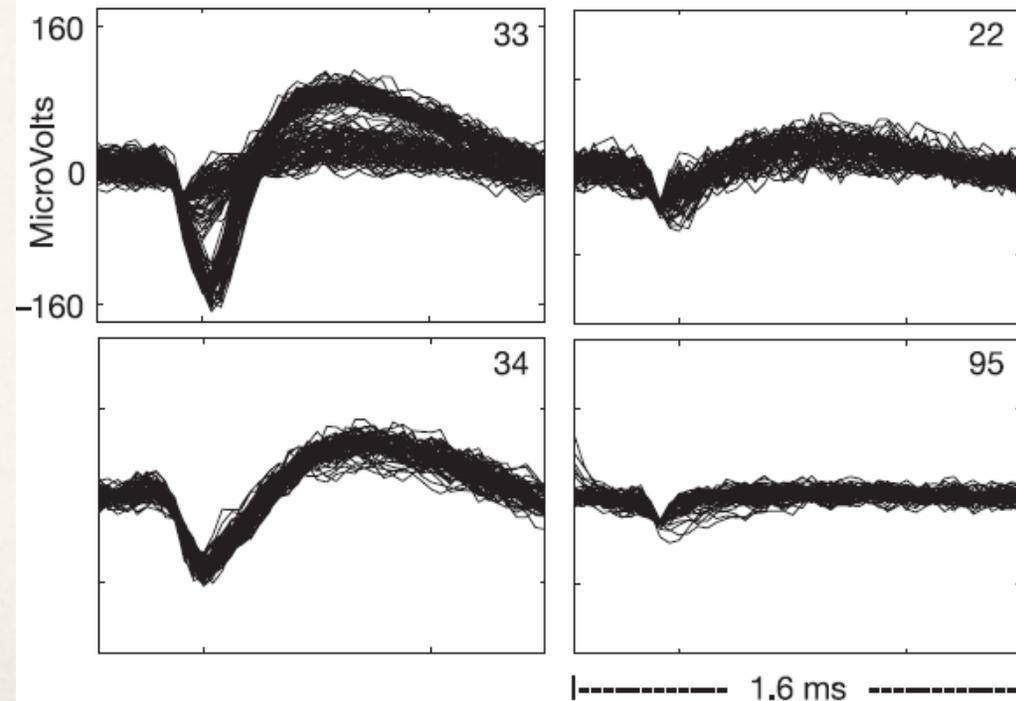
*Zone* : Implant dans le cortex moteur primaire



*Interface* : sonde => décodeur => ordinateur

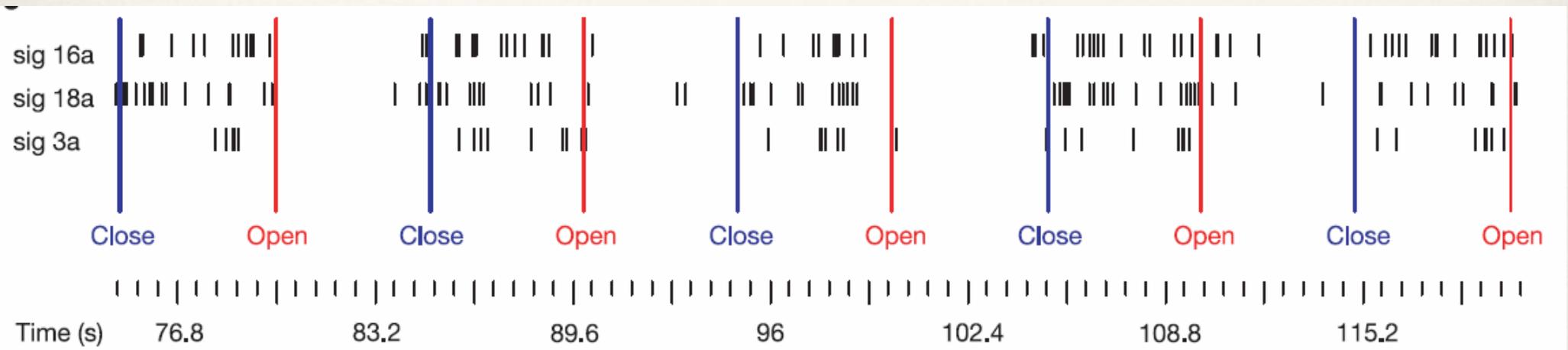
# Modulation

- ❖ *Objectif*: récupérer les motifs de réaction neuronale à une intention motrice
- ❖ Plusieurs types de fonctionnement de neurones:
  - Sélectifs pour une action
  - Sélectifs pour plusieurs actions
  - En action tout le temps



# Modulation

- ❖ Construction d'un filtre liant schémas de potentiels d'actions et intention motrice



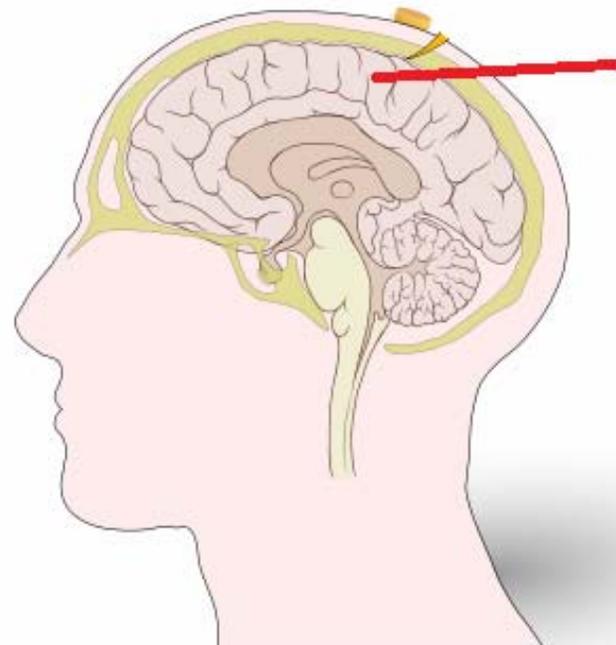
*Enregistrements d'électrodes pour les actions d'ouverture et de fermeture de la main*

# Contrôle

- ❖ *Objectif*: le contrôle d'un curseur en 2D
- ❖ *Expérience 1* : atteindre une cible depuis le centre de l'écran et la fixer



M. Nagle imagine déplacer sa main



Intention de faire un mouvement de la main



# Contrôle

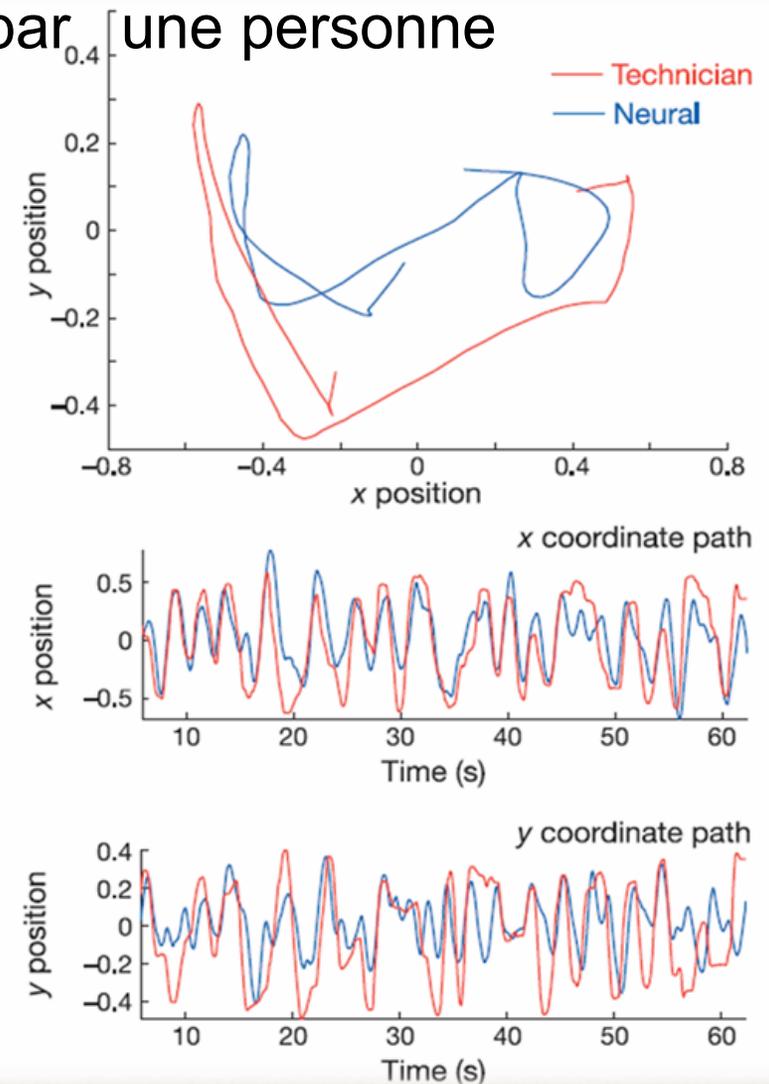
- ❖ *Expérience 2* : suivi d'un marqueur dirigé par une personne extérieure

## Résultats :

- entre 73% - 95 % de taux d'atteinte
- activité neuronale importante

## Difficultés :

- mouvement imprécis
- lent : temps d'atteinte = 2,5s
- instable: difficile de fixer la cible



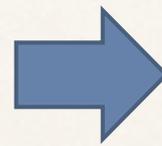
# Contrôle

- ❖ Est-ce vraiment un contrôle neuronal du curseur ?



- *Sujet tétraplégique* : la commande motrice est-elle la bonne ?

- *Mouvements parasites* : tête, épaules

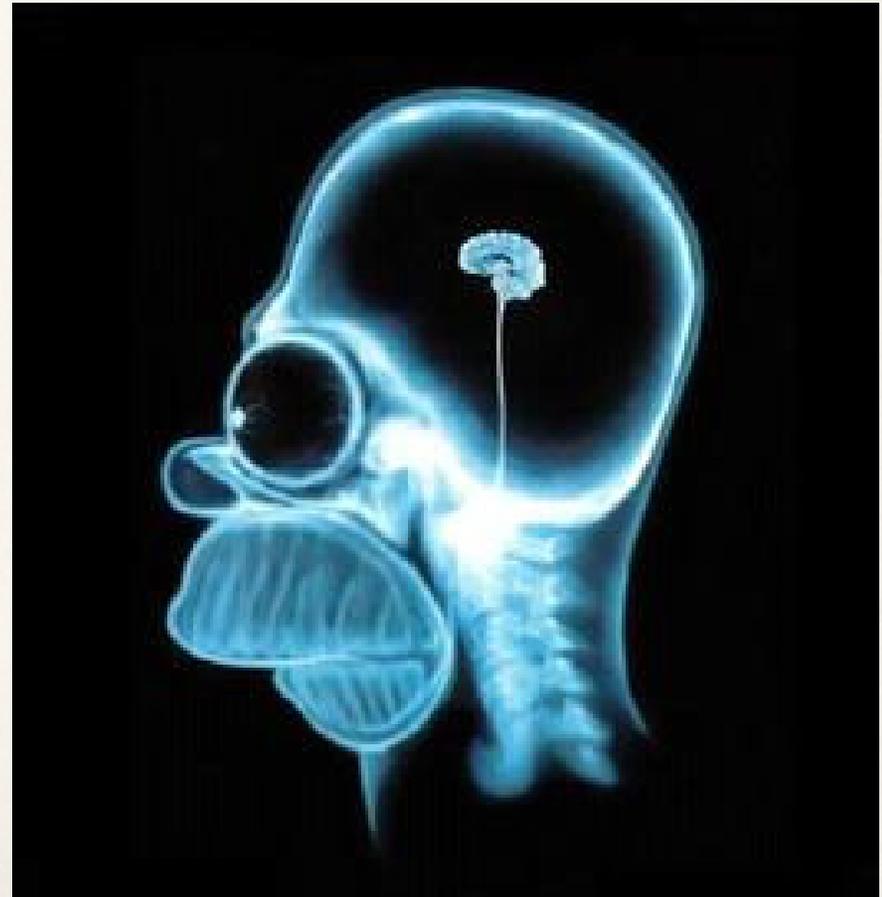


Enregistrement vidéo et corrélation quasi nulle

# Améliorations

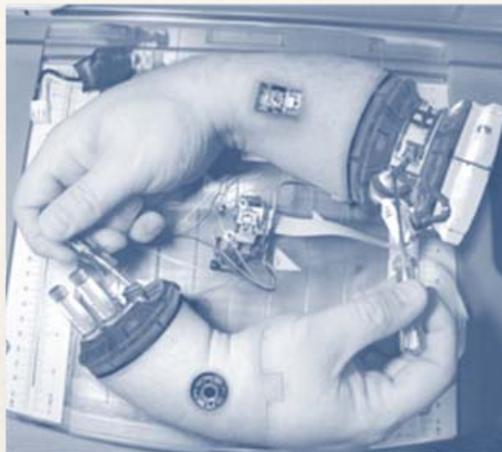
---

- Contrôle encore peu précis :
  - *Causes physiques* : lésion initiale
  - *Sujet d'étude* : motivation et concentration
  - *Méthode* : filtre utilisé et conception
  - *Entraînement* : plasticité cérébrale
  - *Feedback*: utilisation des autres sens



# Vers l'avenir

- ❖ **Matthew Nagle a réussi à contrôler des applications informatiques simples et un bras mécanique**
- ❖ **Contrôle intuitif et découlant directement de l'étude des communications neuronales du cortex moteur**
- ❖ **Contrôle en parallèle par l'implantation de plusieurs électrodes sur différentes zones corticales**





# «Visual Spatial Attention Tracking Using High-Density SSVEP Data for Independent Brain-Computer Communication»

Simon P. Kelly, Edmund C. Lalor, Richard B. Reilly, John J. Foxe

---

*12 novembre 2009*

# Une interface qui repose sur l'Electroencéphalogramme (EEG)

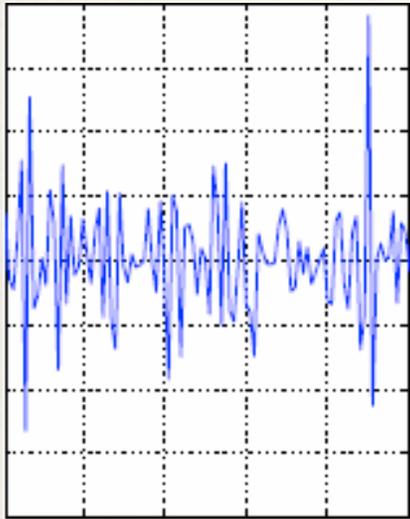
---

- ❖ Une approche non-invasive
- ❖ Des enregistrements de haute résolution
- ❖ Une multitude de signaux à exploiter
  - activités oscillatoires
  - potentiels P300
  - cortex moteur
  - cortex visuel → SSVEP



# Steady-State Visual Evoked Potential (SSVEP)

---



- ❖ Caractéristiques

- Réponse à des stimuli visuels périodiques : 4Hz à 75Hz
- Signal généré de même période que le stimuli
- Bon rapport du signal au bruit

- ❖ Systèmes actuels s'appuyant sur le suivi du regard

- Faciles à implémenter
- Bons résultats
- Mais.. demande de bouger les yeux

# Le SSVEP pour suivre «l'attention visuelle»

---

- ❖ Attention visuelle : Capacité du cerveau à préférer **une** information du champ visuel, indépendamment du regard.
- ❖ 1996 : Un stimulus clignotant : augmentation de l'amplitude du SSVEP à cette fréquence.
- ❖ Première expérience de BCI s'appuyant sur cette découverte
  - Résultats encourageants mais très variables selon les individus
  - Incertitudes expérimentales : position des électrodes, choix des fréquences
- ❖ 2000 : Deux stimuli clignotants : Activité décentrée dans le cortex pariéto-occipital pour des fréquences Alpha (8-14Hz).
  - Application à une BCI faisant des choix binaires. Précision de 73%.

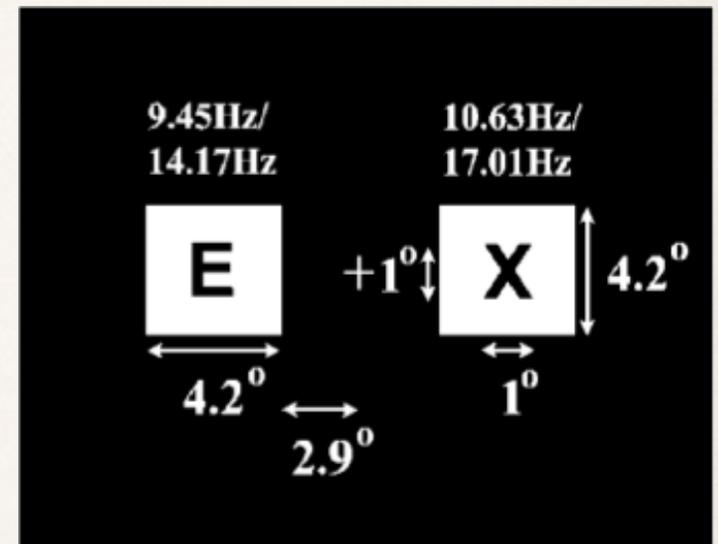
# Objectifs de l'expérience

---

- ❖ Optimiser le choix des Electrodes
  - Utilisation d'un EEG haute résolution (64 canaux)
- ❖ Comparer le choix des fréquences Alpha (8-14Hz) ou non-Alpha
- ❖ Estimer le lien entre précision du BCI et concentration du patient
  - Ajout d'un côté ludique avec estimation des performances
- ❖ Combiner les deux propriétés des SSVEP

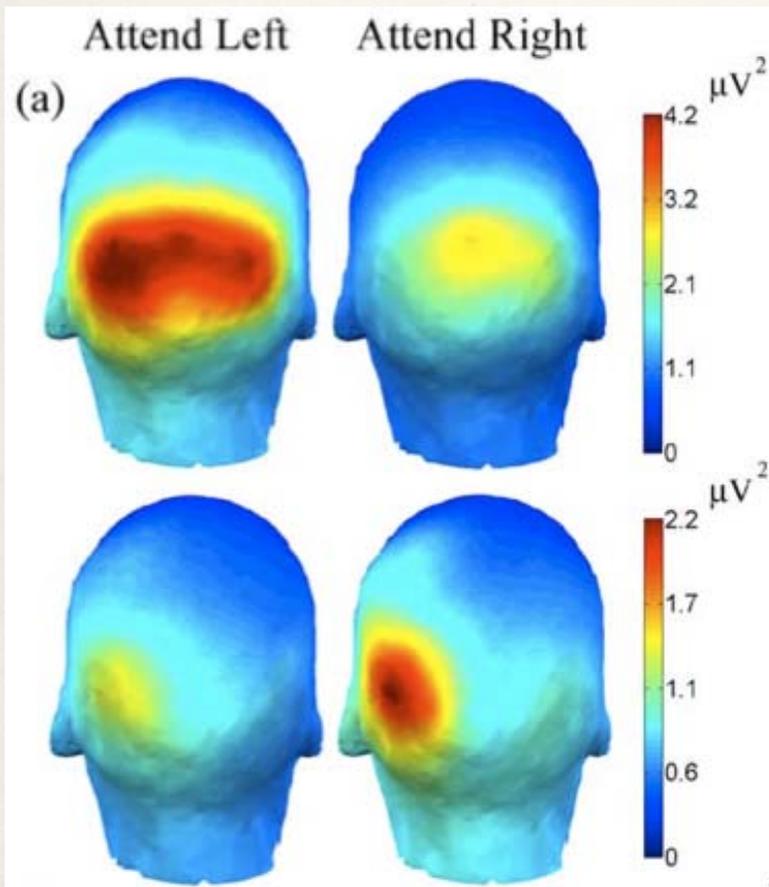
# Protocole expérimental

- ❖ 10 sujets valides
- ❖ 2 rectangles clignotants à des fréquences différentes (9.45Hz et 10.63Hz : Alpha, 14.17Hz et 17.01Hz : non-Alpha)
- ❖ 1 lettre parmi 9 tous les 3 flash
- ❖ Expérience de 8 sec répétée 100 fois : compter le nombre de lettres 'X' dans un seul des rectangles
- ❖ Le regard reste fixé sur la croix centrale



# Analyse des données

- ❖ Déterminer les électrodes les plus discriminantes



- ❖ Pour chaque cas  $n$  on calcule les puissances à chaque fréquence  $f1$  ou  $f2$  et pour chaque électrode A ou B

$$F(n) = (X^A_n(f1), X^A_n(f2), X^B_n(f1), X^B_n(f2))$$

- ❖ On calcule la puissance sur la bande Alpha pour chaque hémisphère
- ❖ On retire les données biaisées par un mouvement horizontal des yeux (<6%)
- ❖ On classe les données restantes

# Résultats

- ❖ Choix des couples d'électrodes
- ❖ Comparaison des performances selon les fréquences de travail
- ❖ Cas «Overt» où le regard n'est plus figé

TABLE I  
CLASSIFICATION ACCURACIES FOR ALL SUBJECTS OVER 5 SESSIONS  
USING THE SSVEP FEATURE ALONE. ALSO SHOWN ARE THE  
OPTIMAL ELECTRODE LOCATIONS FOR EACH SUBJECT

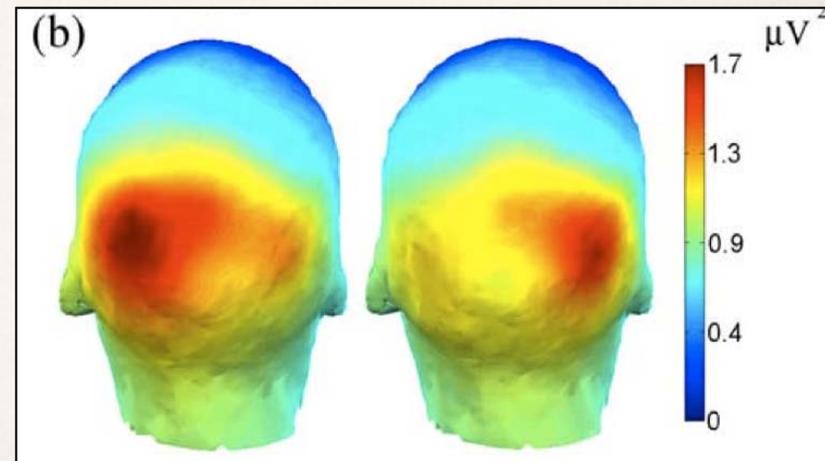
Subject:	Accuracy	Electrodes	
1 ALPHA	68.1%	POz	PO7
NONALPHA	68.0%	PO8	P8
2 ALPHA	64.0%	O1	Pz
NONALPHA	62.6%	PO8	Pz
3 ALPHA	70.7%	P7	PO3
NONALPHA	67.0%	O1	PO3
4 ALPHA	72.4%	PO8	O1
NONALPHA	70.6%	P5	PO7
5 ALPHA	78.1%	Oz	PO4
NONALPHA	69.4%	P8	P4
6 ALPHA	72.3%	PO4	P O3
NONALPHA	63.0%	TP8	P9
7 ALPHA	67.4%	P4	PO4
NONALPHA	85.1%	POz	Oz
8 ALPHA	77.7%	PO3	PO4
NONALPHA	62.6%	CP2	PO3
9 ALPHA	81.9%	O1	P6
NONALPHA	86.0%	PO4	P10
10 ALPHA	63.9%	O2	P8
NONALPHA	68.8%	Oz	P7
<b>Average</b> ALPHA	71.7%	-	-
NONALPHA	70.3%	-	-
<b>Overt</b> ALPHA	94.7%	Oz	-
NONALPHA	95.2%	only	-

# Résultats

TABLE III  
CLASSIFICATION ACCURACIES FOR NONALPHA SESSIONS FOR ALL SUBJECTS  
USING THE SSVEP FEATURE, ALPHA BAND FEATURE AND COMBINATION

Subject:	SSVEP	Alpha Band	SSVEP + Alpha Band
1	68.0%	59.3%	74.5%
2	62.6%	58.5%	63.1%
3	67.0%	59.6%	70.7%
4	70.6%	85.7%	87.0%
5	69.4%	72.9%	76.1%
6	63.0%	82.7%	86.5%
7	85.1%	66.0%	85.5%
8	62.6%	83.7%	80.0%
9	86.0%	74.1%	85.7%
10	68.8%	85.5%	85.8%
Average	70.3%	72.8%	79.5%

- ❖ Complémentarité des deux approches : SSVEP en non-Alpha et Alpha Band



# Conclusions et perspectives

---

- ❖ BCI non-invasif qui permet un choix binaire avec 79% de précision
- ❖ Nécessité d'adapter le choix des électrodes et des fréquences à chaque individu
- ❖ Corrélation des performances individuelles avec la précision du BCI
- ❖ Design novateur fonctionnant sur un plus grand nombre de patients
- ❖ Améliorations possibles :
  - Meilleure connaissance des liens entre SSVEP à différentes fréquences
  - Utilisation de classificateurs non-linéaires
  - Utilisation de capteurs plus ciblés, vers un BCI invasif ?

# Conclusion

---

- ❖ Objectif très motivant : rendre mobilité et capacité de communication à des personnes qui peuvent être très sévèrement handicapées
- ❖ Autres utilisations possibles : restauration d'activité motrice, soin de l'épilepsie, neuro-prothèses, jeux vidéos, pseudo-télépathie, exosquelette...
- ❖ Contribue à la compréhension fondamentale de la neurophysiologie
- ❖ Avancées nécessaires pour populariser les technologies émergentes :
  - fiabilité
  - facilité de mise en œuvre
  - découverte de marqueurs physiologiques adaptés
  - acceptation biologique à long terme des implants
  - adaptation dynamique à long-terme de l'algorithme
  - étude du bienfait apporté réellement dans la vie courante