

Master 2 SIF - Option VRI
Univ Rennes



Interactions en RV:
interfaces cerveau-ordinateur
et interfaces haptiques

Anatole Lécuyer (Inria)

anatole.lecuyer@inria.fr



Interaction Cerveau-Ordinateur

Anatole Lécuyer

anatole.lecuyer@inria.fr

Interfaces Cerveau-Ordinateur

Introduction générale

Acquisition et capteurs

Signaux physiologiques utilisés

Identification de l'activité cérébrale

Exemples concrets de BCI

Et l'utilisateur ?

En France ?

Résultats et travaux récents

Conclusion



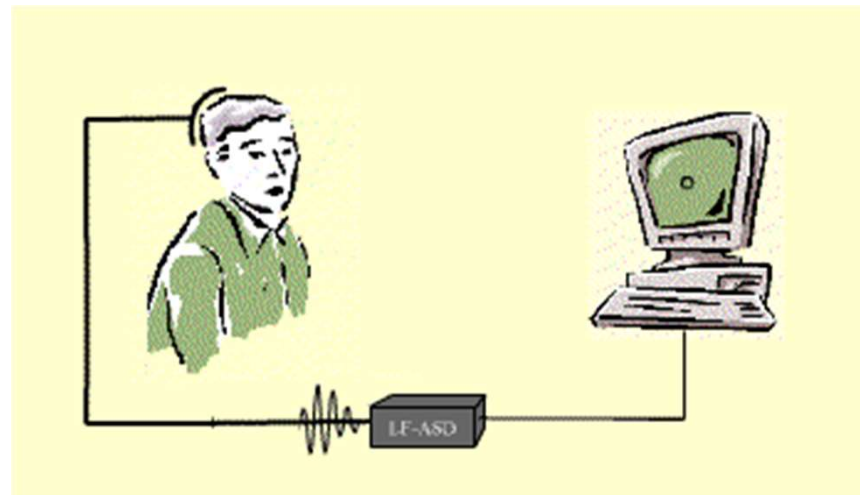
Introduction générale

Interface Cerveau-Ordinateur (ICO) ?

Systeme de communication

Messages via l'activite cerebrale

« *Brain-Computer Interface* » ou « *BCI* » en anglais



Vidéo introductive

>> Lecture (VF)

>> Lecture (VA)

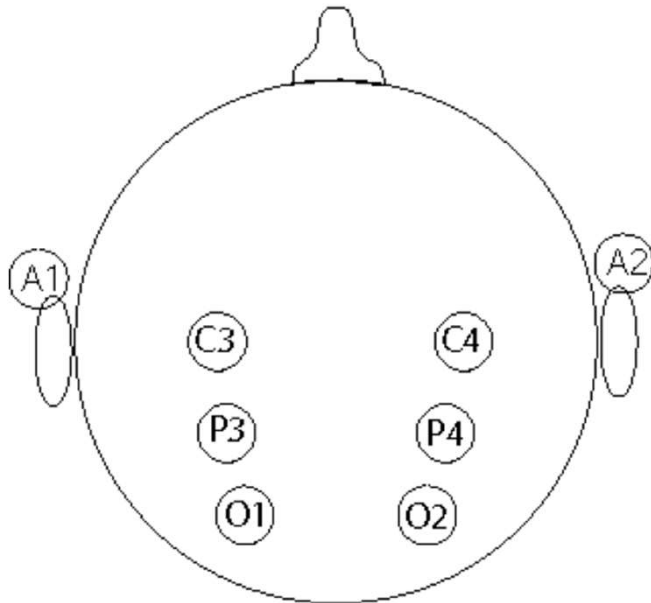
Quelle activité cérébrale ?

Échange de courants électriques entre neurones

- Différentes régions et fonctions (motricité, attention, etc)
- Mesurable en surface (Electro-Encéphalo-Graphie ou EEG)

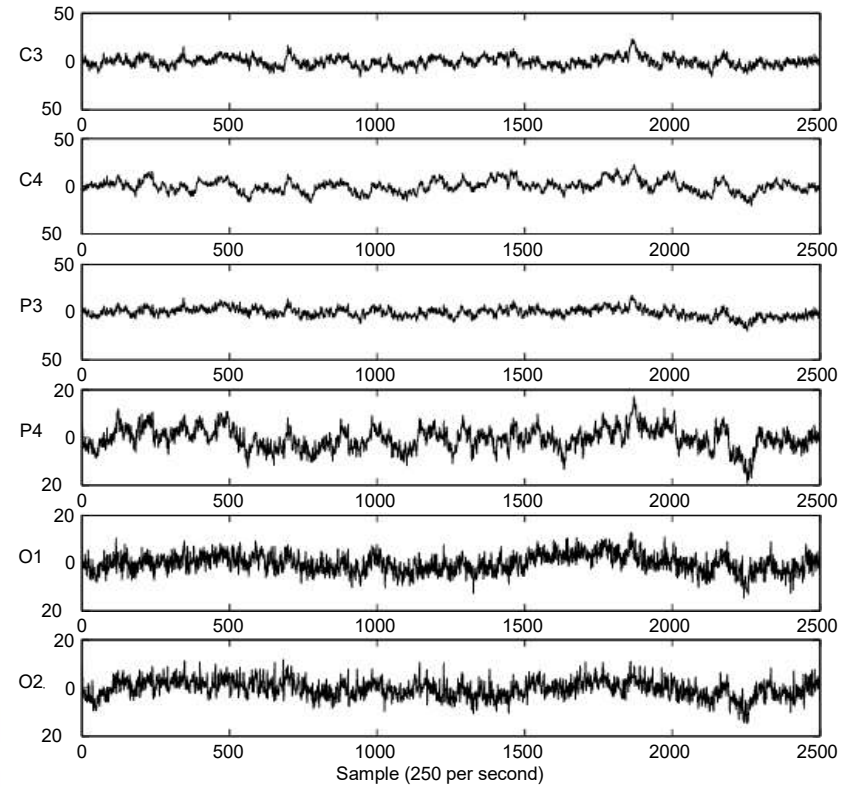


Signaux obtenus par EEG

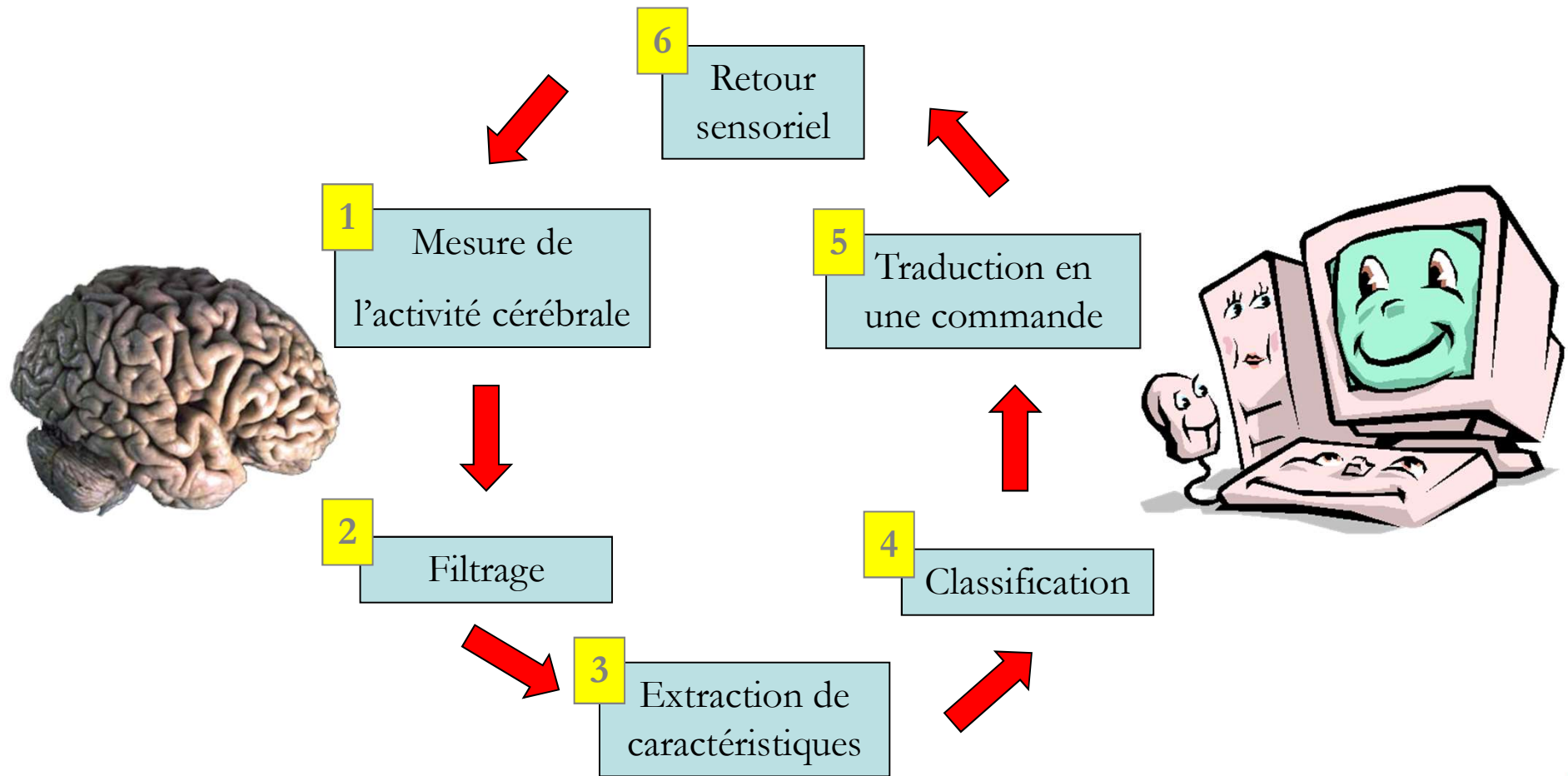


Eyes open

Eyes closed



Fonctionnement d'une ICO



Applications

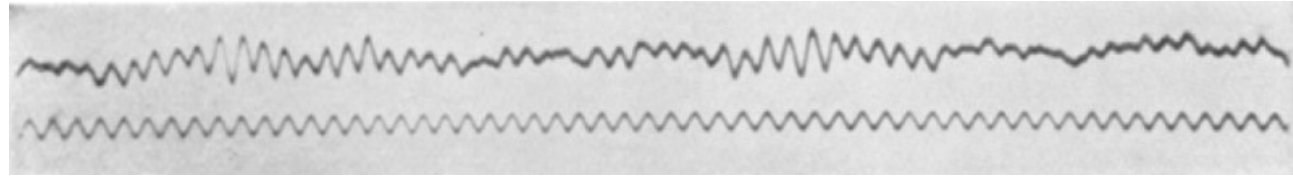
Handicap (communication, motricité)

Contrôle (robot, véhicule, téléphone)

Multimédia (jeux, réalité virtuelle)



Histoire



(Hans Berger, *Archives für Psychiatrie*, 1929)

Plusieurs dizaines d'années :

- ✓ [Berger, 1929] : mise en évidence de l'EEG
- ✓ [Dewan, 1967] : rythme Alpha pour des messages morse
- ✓ [Vidal, UCLA, 1973] : introduction du terme « BCI »
- ✓ [Farwell and Donchin, 1988] : signal P300 pour une machine à écrire virtuelle (2.3 caractères/mn)
- ✓ [Pfurtscheller *et al*, 1997] : déplacer un curseur en imaginant des mouvements des mains
- ✓ 2004 : Matrice implantée dans le cortex moteur (Cyberkinetics)



Quels défis scientifiques?

1. Des connaissances sur le cerveau accrues (neuroscience, électrophysiologie)
2. Des capteurs plus efficaces (électronique)
3. Des signaux cérébraux mieux identifiés (traitement du signal)
4. Une interface globalement plus intelligente (ergonomie, ihm)
5. Réaliser le transfert vers le patient (recherche clinique)



Acquisition et capteurs

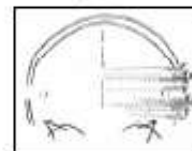
Les principales techniques de mesure de l'activité cérébrale



NIRS



iEEG



EEG



Acquisition

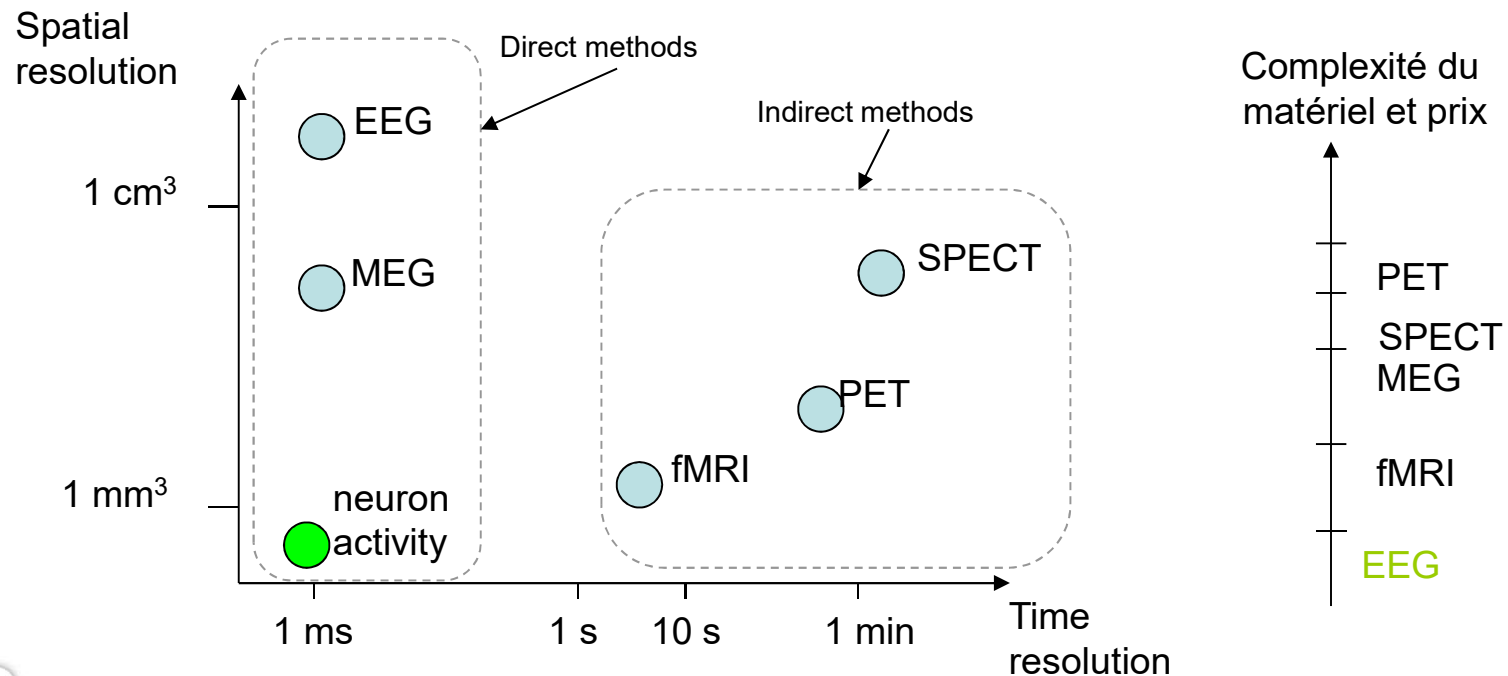


NIRS



Nombreux capteurs : EEG, MEG, fMRI, fNIRS, etc

- Résolution spatiale et temporelle
- Complexité du matériel
- Méthodes directes vs. indirectes



Capteurs électriques

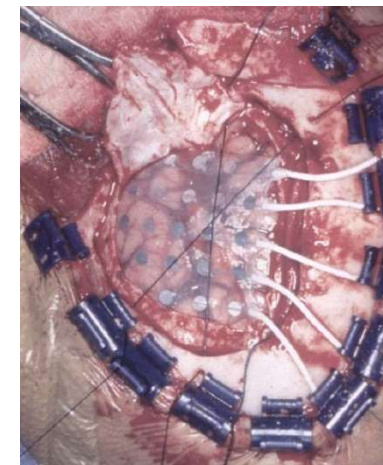
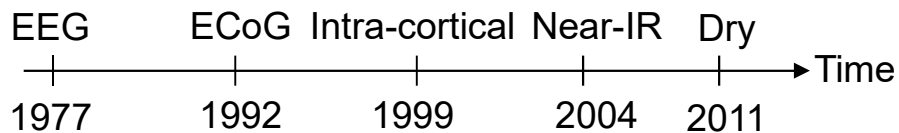
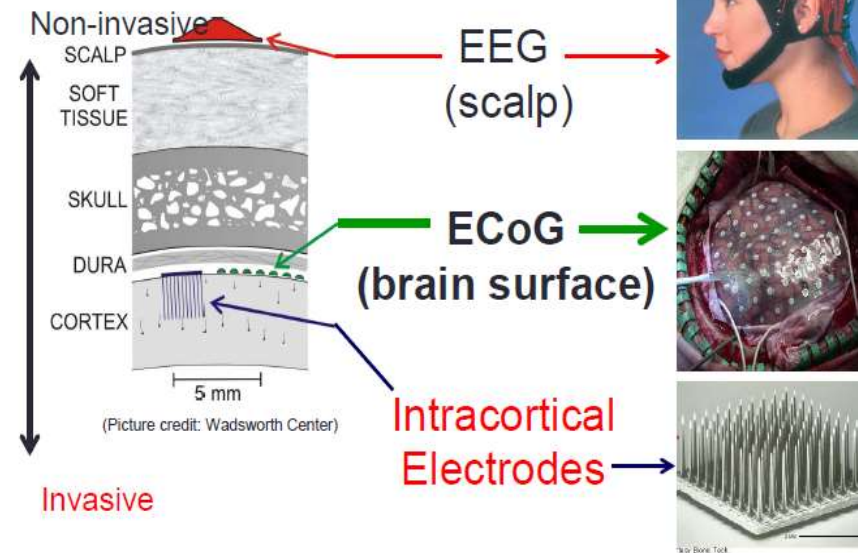
Différents types :

Surface electrodes

- EEG
- Dry electrodes

Invasive electrodes

- ECoG (Electro-Cortico-Graphic)
- Intra-cortical electrodes



ElectroEncéphaloGramme (EEG)

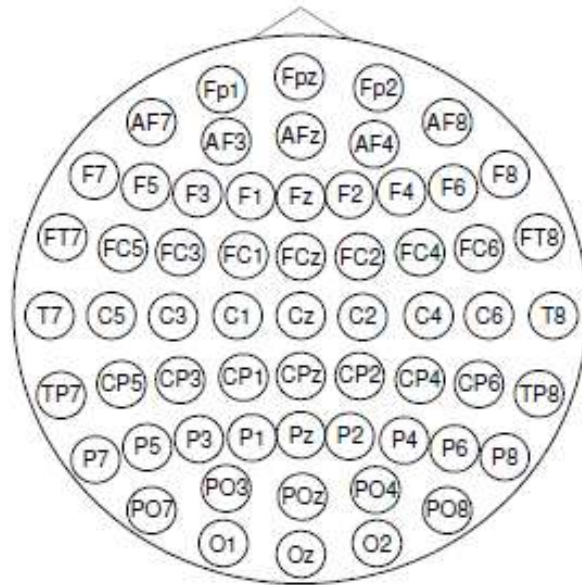


- ▶ Électrodes positionnées à la surface du crâne.
- ▶ Nécessitent l'utilisation de gel conducteur.
- ▶ Problèmes de contact et d'évolution temporelle de la qualité des mesures.
- ▶ Perte d'information car la boîte crânienne atténue les signaux.

Propriétés

- ▶ Mauvaise résolution spatiale (1-2 cm + électrodes corrélées).
- ▶ Très bonne résolution temporelle (1 KHz).
- ▶ Mauvais rapport signal sur bruit.

ElectroEncéphaloGramme (2)



Lettre	Zone
C	Centrale
F	Frontale
AF	Antérieure Frontale
T	Temporale
P	Pariétale
O	Occipitale

Système international 10-20 [ACNS, 2004]

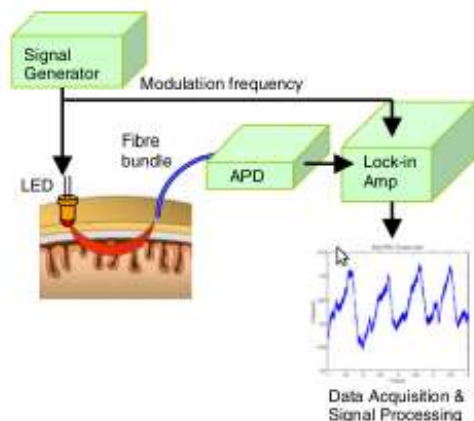
- ▶ Électrodes impaires à gauche du crâne et paires à droite.
- ▶ Les lettres correspondent à des zones du cerveau.

Autres technologies



MagnétoEncéphaloGramme (MEG)

- ▶ Mesure des champs magnétiques induits par l'activité du cerveau.
- ▶ Utilisée à la place des ECoG pour les patients épileptiques.
- ▶ Peu utilisée en ICM.



Spectroscopie proche infrarouge (NIRS)

- ▶ Mesure le taux d'oxygénation de l'hémoglobine.
- ▶ Remplacement partiel des IRMf plus portable.
- ▶ Variation très lente.

Conclusion sur l'acquisition en ICM

Méthode	RSB	Rés. Spatiale	Rés. Temporelle	Invasive	Transport
IND	++	++	++	--	.
ECoG	+	+	++	-	.
EEG	--	-	++	++	+
IRMf	++	++	--	++	--
MEG	+	+	++	++	--
NIRS	+	-	--	++	+

Dans ce cours, nous nous concentrerons sur les mesures EEG :

Avantages

- ▶ Technologie la plus commune.
- ▶ Coût du matériel.
- ▶ Transportable.
- ▶ Utilisable par tout le monde, non-invasive.

Inconvénients

- ▶ Mauvais RSB.
- ▶ Temps de mise en oeuvre.
- ▶ Signaux corrélés.

« Tendances »

Invasif (US) versus non invasif (EU)

Tendances EEG :

plus de capteurs, électrodes sèches, systèmes grand-public

Autres capteurs : IRMf, fNIRS, etc



emotivo
you think, therefore, you can





Signaux cérébraux utilisés

Connaissances a priori : *spatiales*

Lobes cérébraux :

Lobes Frontaux

Emotions, résolution de problèmes

Lobes Pariétaux

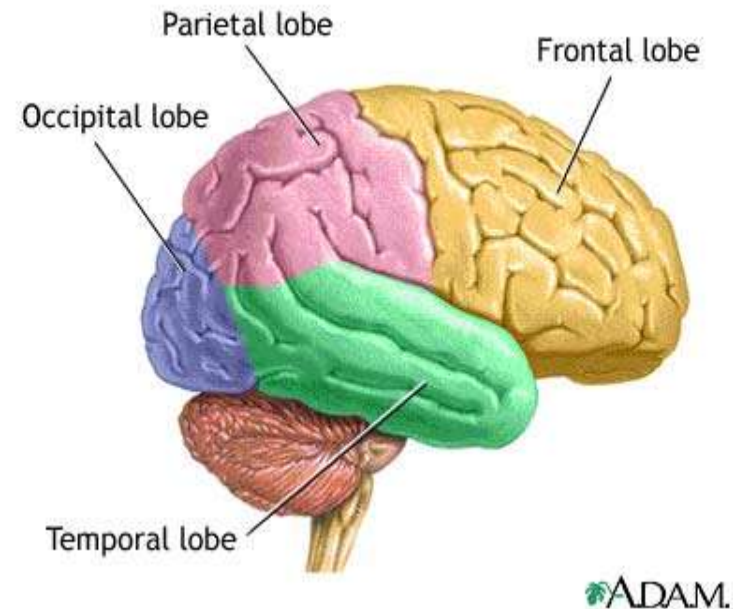
Relations spatiales, capacités mathématiques, mémoire non verbale

Lobes Occipitaux

Vision, couleur, forme et mouvement.

Lobes Temporaux

Traitement de l'audition et de la parole, compréhension du langage, mémoire à long terme

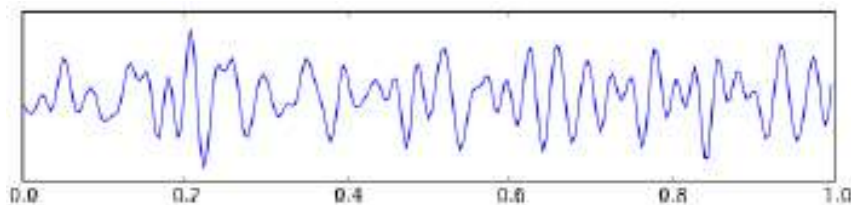
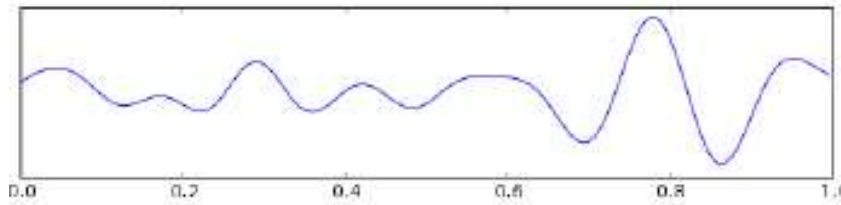
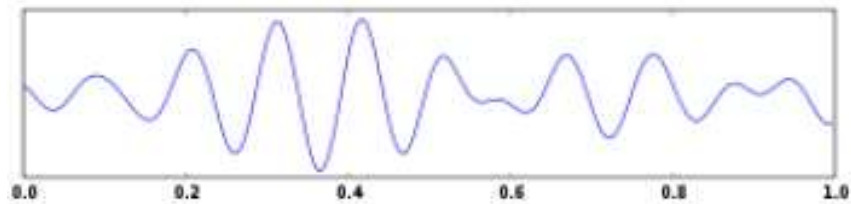
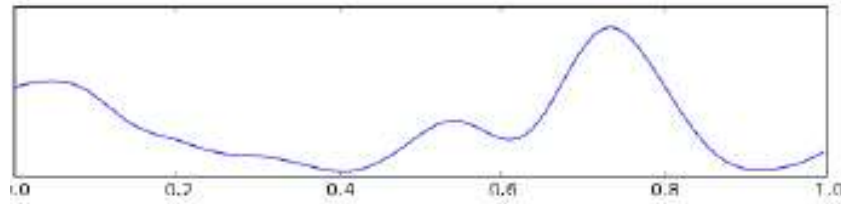


Connaissances a priori : *fréquentielles*

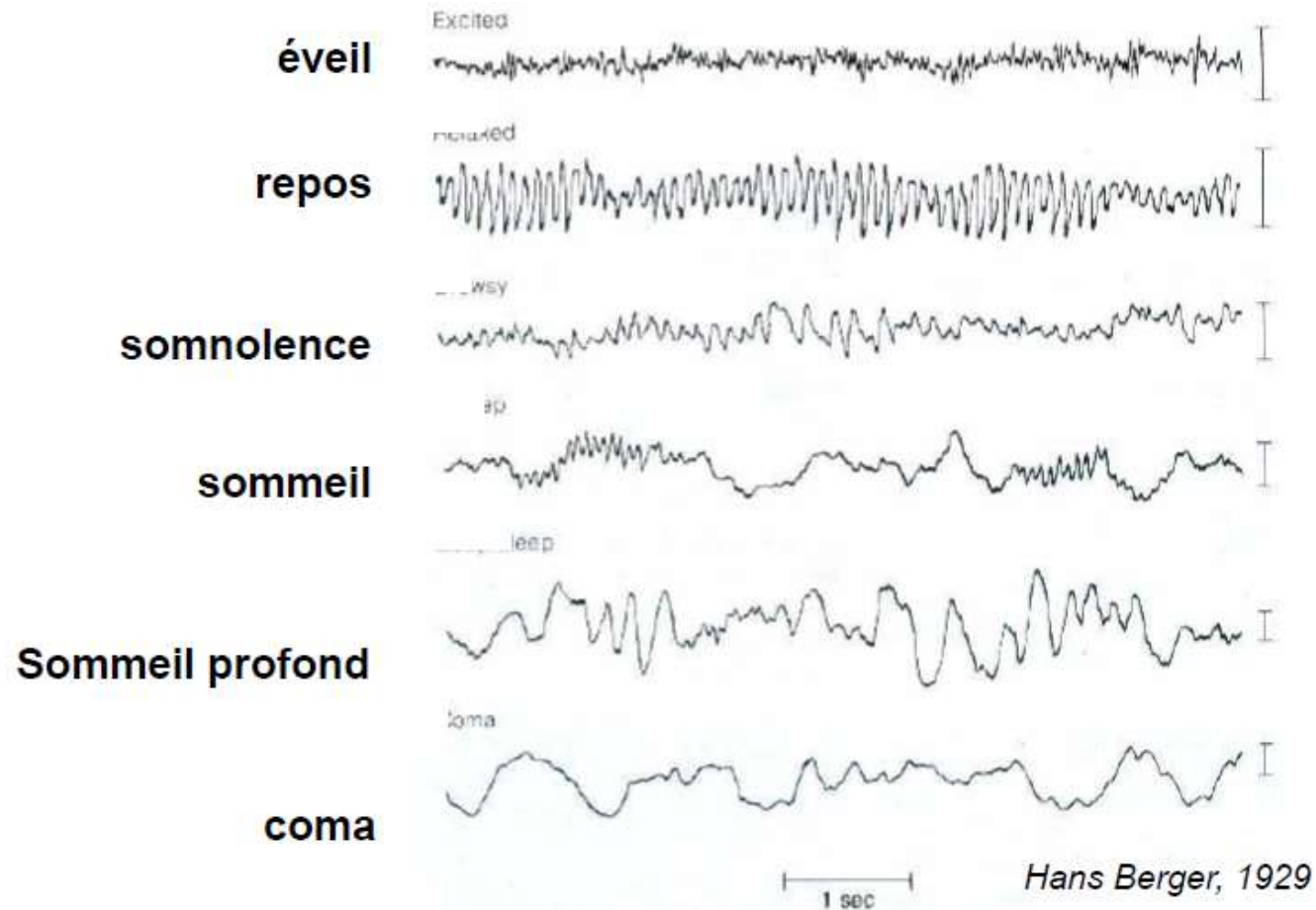
	fréquence	amplitude
▪ delta	< 3 Hz	100 – 200 μ V
▪ theta	4 - 7 Hz	10 – 30 μ V
▪ alpha	8 - 13 Hz	20 – 60 μ V
▪ mu	9 - 15 Hz	20 – 60 μ V
▪ beta	15 - 30 Hz	< 20 μ V
▪ gamma	> 30 Hz	< 10 μ V

Caractéristiques des ondes cérébrales

- Delta [0,4] Hz : sommeil, empathie
- Thêta [4, 7.5] : rêverie, méditation, idées créatives
- Alpha [7.5,12] : lorsque les yeux sont fermés. États positifs et relâchés.
- Bêta 12Hz+ : état actif, yeux ouverts



Tracés EEG (Berger, 1929)



Quel « vocabulaire mental » ?

- ✓ Ordinateur : détecter
- ✓ Utilisateur : contrôler et apprendre
- ✓ Aujourd'hui : limité !



Vocabulaire mental actuel

Contraintes :

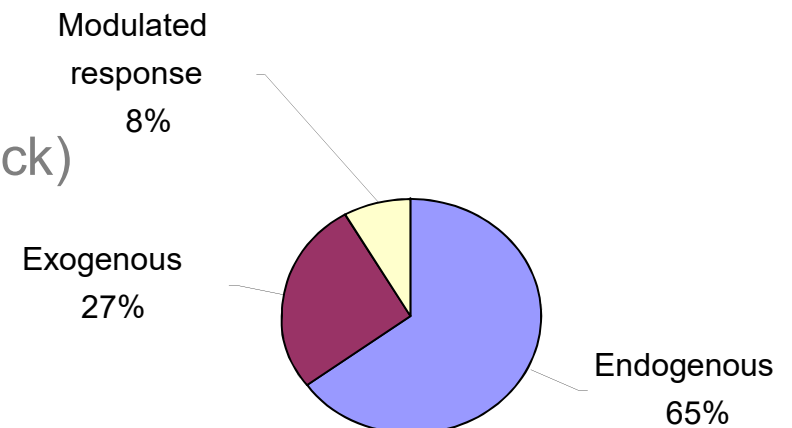
Basé sur des « tâches mentales » connues

Des tâches faciles à apprendre ou à contrôler

Des tâches différenciables à partir de l'activité neuronale électrique

3 types :

1. Endogènes
2. Exogènes (potentiels évoqués)
3. Réponses modulées (biofeedback)



Mason et al. paper [1] : a survey of BCI design from 1977 to 2004 (about 150 publications).

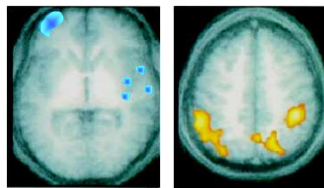
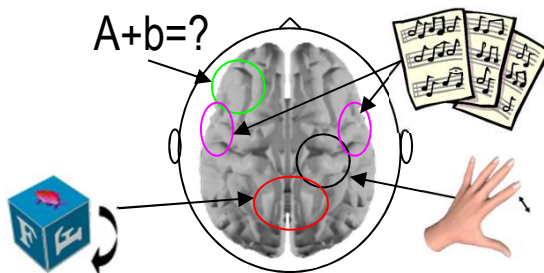
1) Tâches « endogènes »

Activité modulée intérieurement

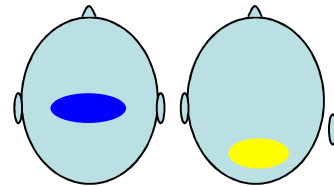
Différents types de tâche →

>> Différentes régions cérébrales :

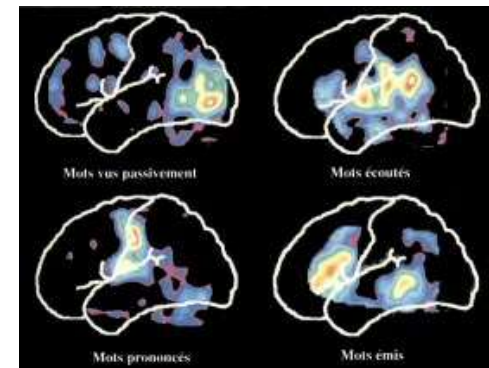
- Imagination de mouvement (mains, pieds, langue)
- Calcul mental
- Association de mot
- Rotation mentale de cube
- Relaxation
- Evocation Visuelle/audio/tactile
- Composition mentale de lettre
- Comptage visuel
- Attention visuelle (Gauche/Droite)



Calcul mental



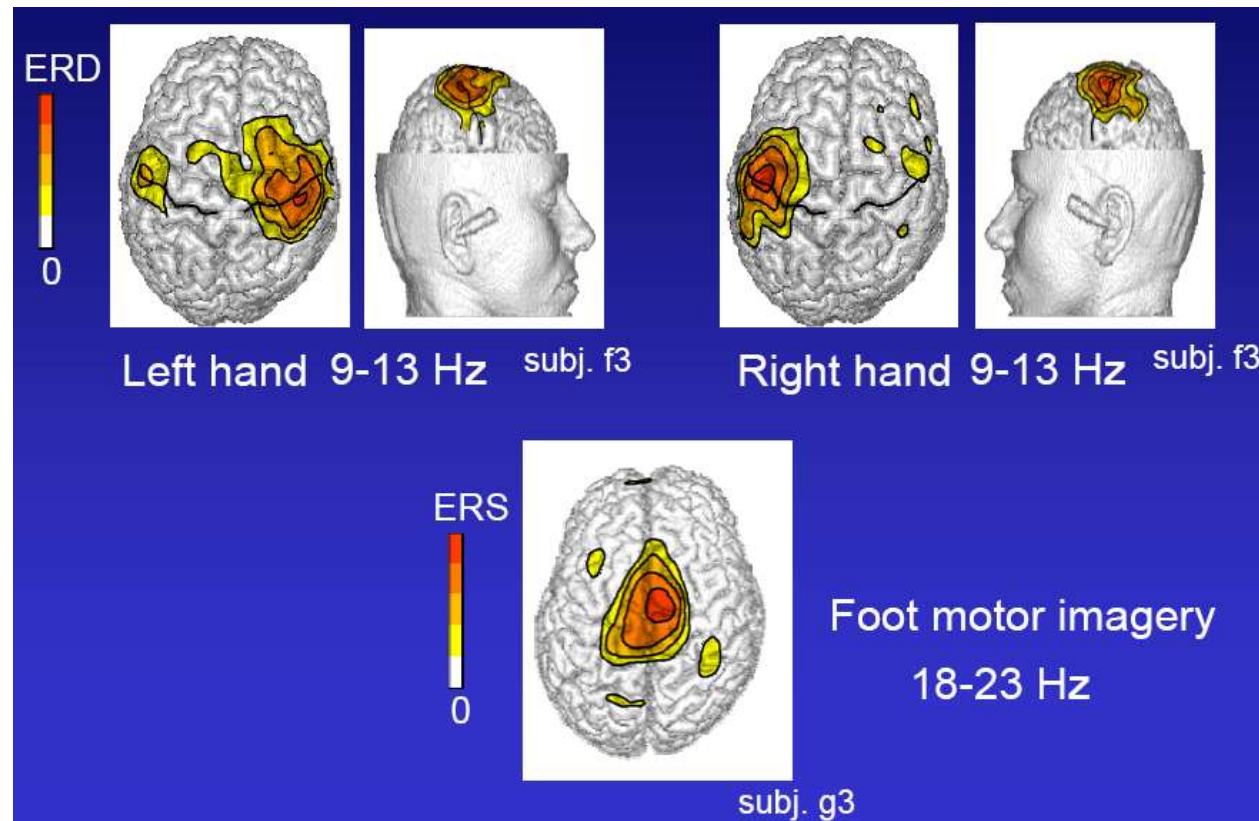
Rotation d'objet



Prononciation et écoute de mots

Imagination de mouvements

(source : Graz University)

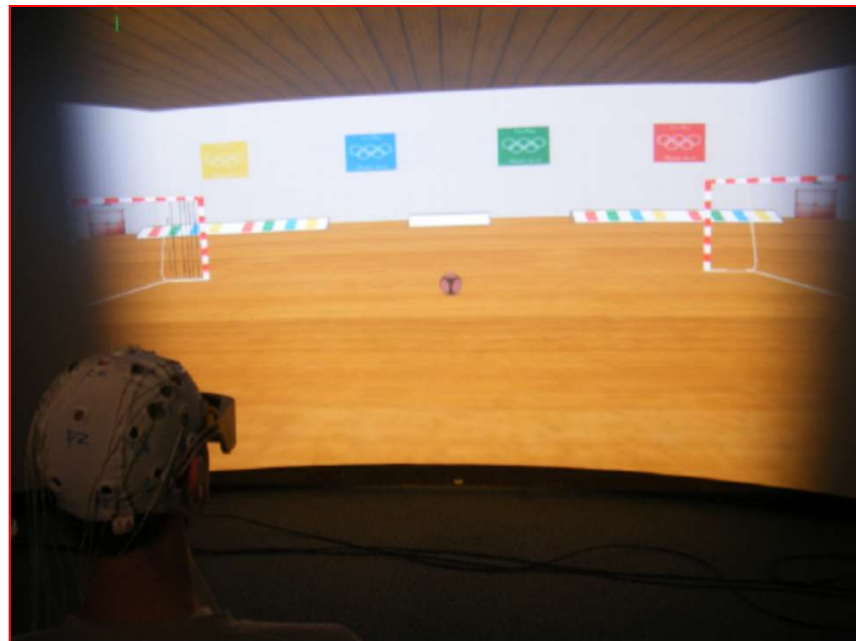


Exemple imagination motrice

Jeu en réalité virtuelle : « HandBall » (Inria Rennes)

Mouvements imaginaires : main gauche vs. main droite

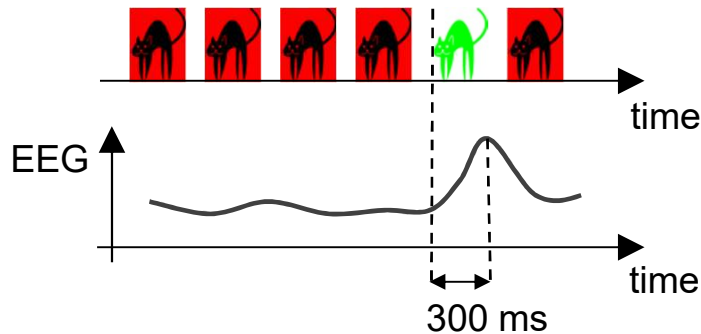
Contrôle d'une balle virtuelle



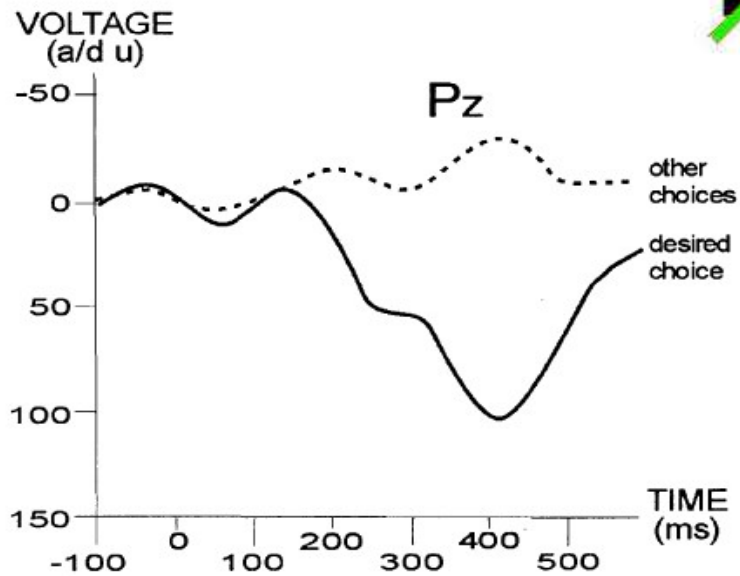
2) Tâches « exogènes »

- **Exogène : activé par un événement extérieur (Event-Related Potential)**
- **Très stable d'un utilisateur à l'autre**
- **Pas d'entraînement**
- **Signaux classiques :**
 1. P300 : Événement important et rare
 2. SSVEP : Stimulus « flash »

Potentiels évoqués visuels : P300



Signal observed when the subject is expecting a rare stimulus



Measured on electrodes located above centro-parietal areas 300 ms after the stimulus occurred

Exemples P300

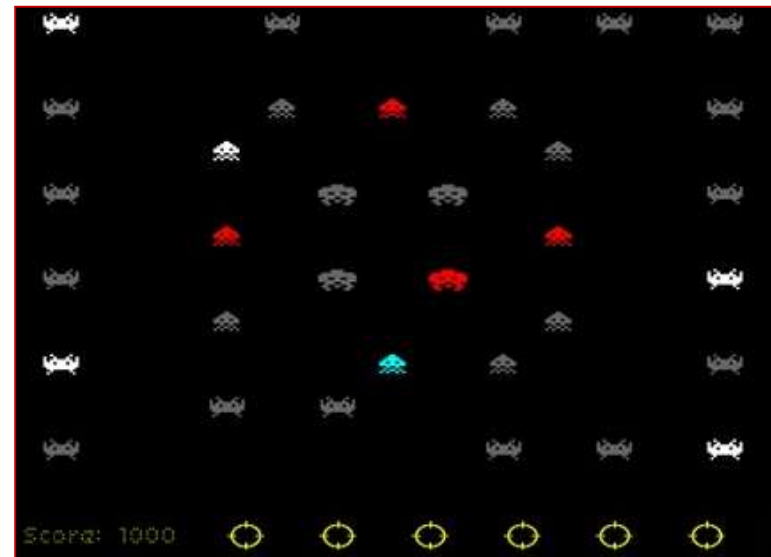
P300 Speller

(Wadsworth Center/BCI2000)



Jeu vidéo Brain Invaders

(GIPSA Lab)



P3-Speller (autre exemple)



**Centre de
recherche en
Neurosciences
de Lyon**

OpenViBE

**3 secondes
stimulation**

**1 lettre flashe à
la fois**

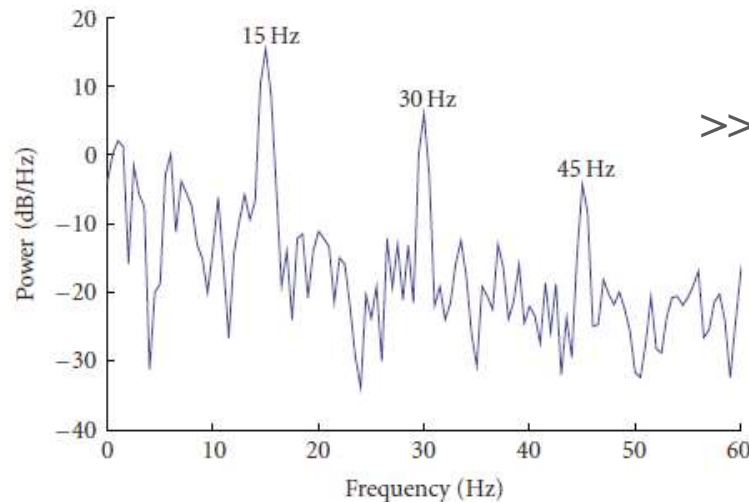
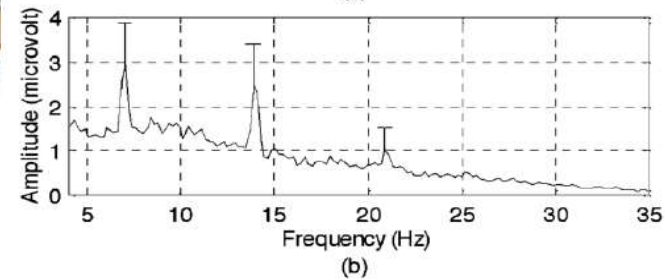
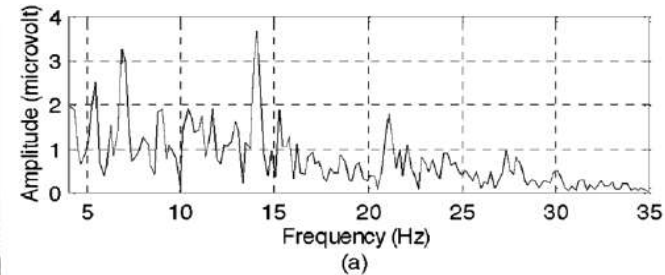
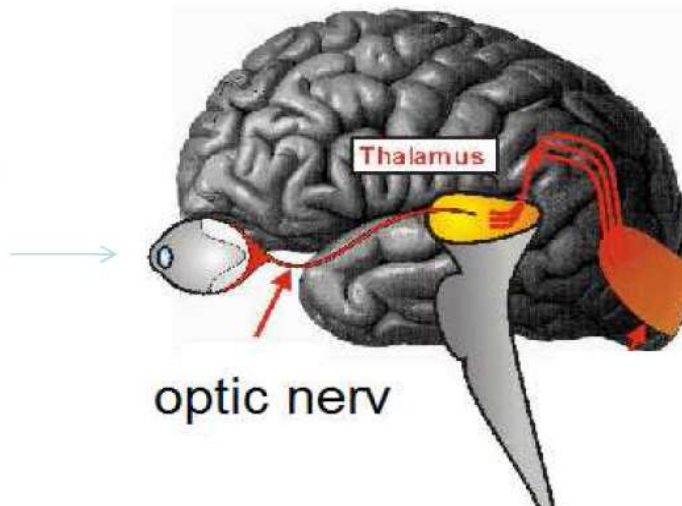
P300 et VR

Société Neurable (US)



Potentiels évoqués visuels : SSVEP

7
Hz



>> 15 Hz stimulation

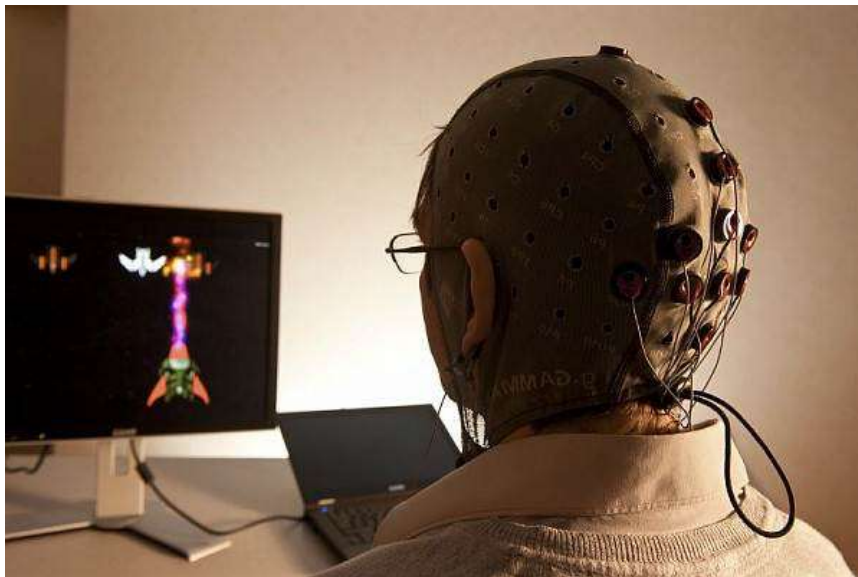
*Spectrum of signals
recorded in visual areas
(occipital lobe)*

Exemple SSVEP (Inria)

Jeu vidéo MindShooter (Inria Rennes)

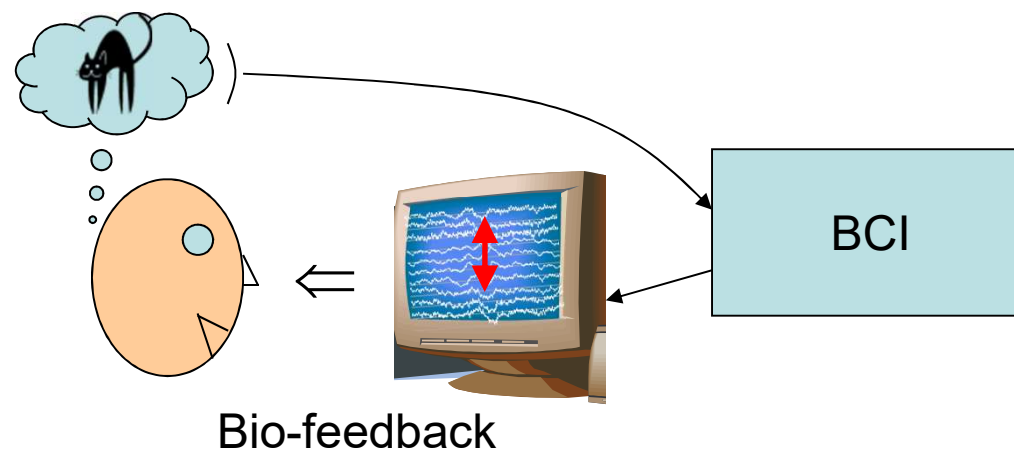
Utilisation du signal SSVEP

Jeu vidéo inspiré de « Space Invaders »



3) Réponse modulée

Modulée intérieurement en réponse à un stimulus ou à un retour
Les utilisateurs apprennent à contrôler des ondes spécifiques



Exemple: SCP*

* Slow Cortical Potentials

Exemple réponse modulée

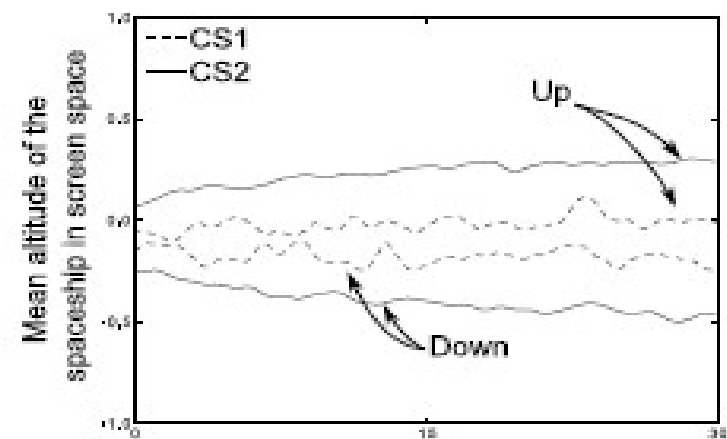
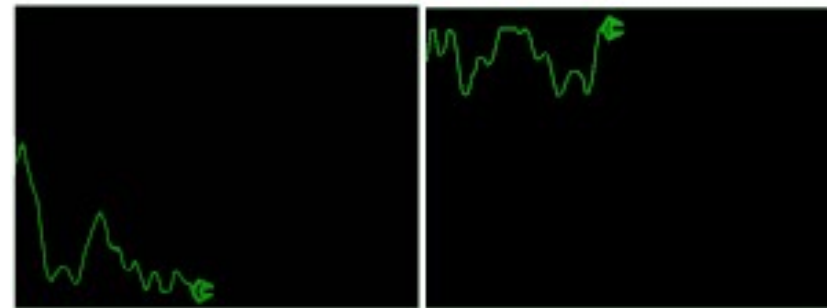
Curseur et cible (Wadsworth,BCI2000)

Contrôle du rythme Mu
Atteindre la hauteur d'une cible



Jeu Inria Rennes

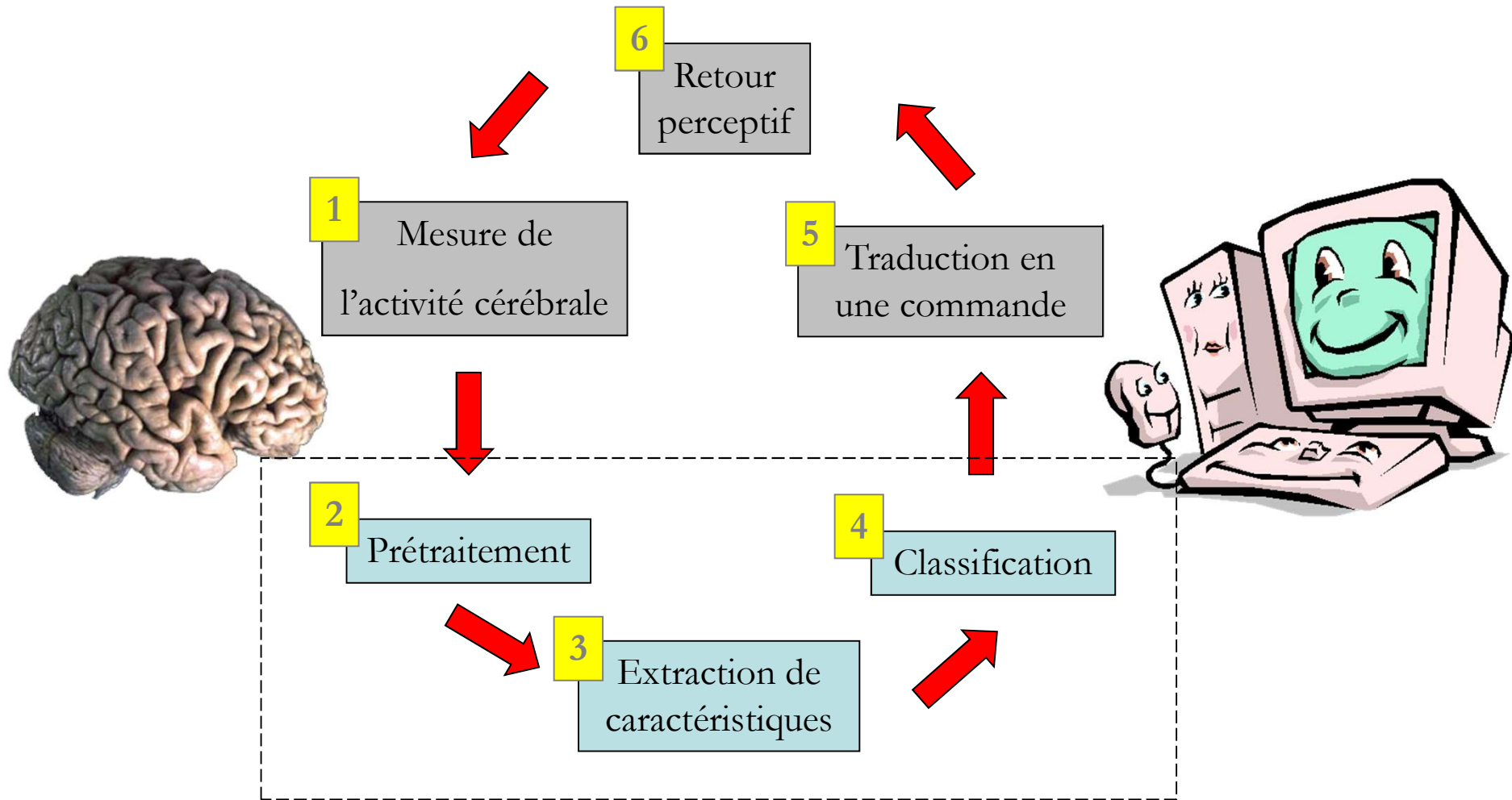
Contrôle du rythme Alpha
Contrôle Altitude



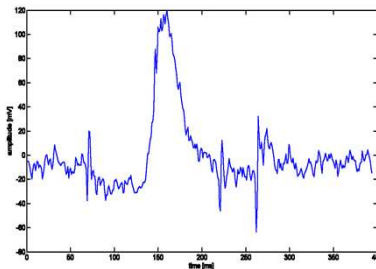
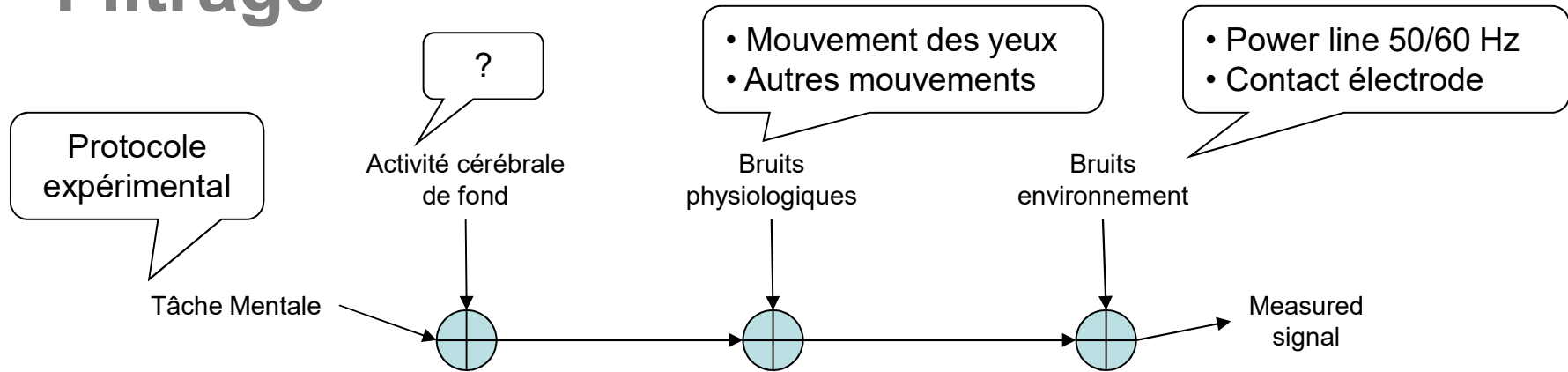


Identification de l'activité cérébrale (EEG)

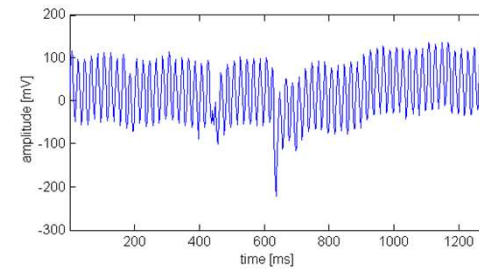
Identification



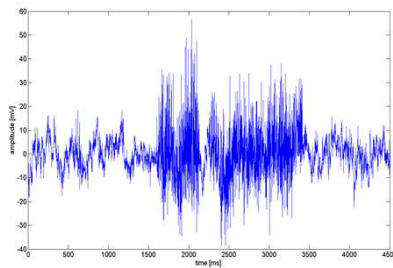
Filtrage



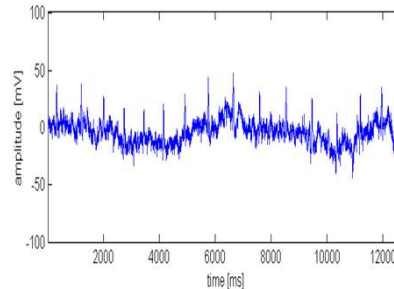
Eye blink



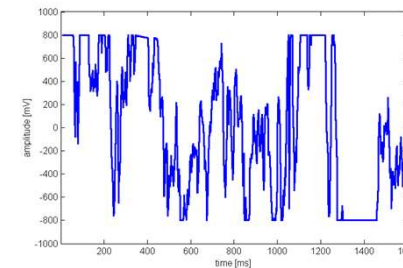
Power line



Jaw clenching



Heart rate



Electrode contact

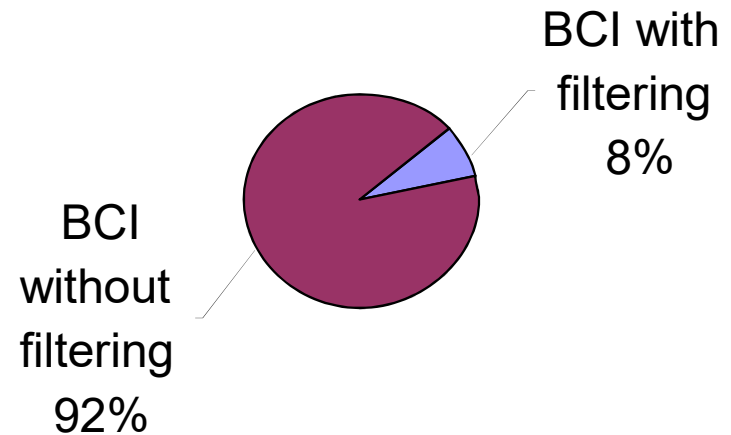
Filtrage

Élimination des artefacts

- Marquer
- Rejeter
- Filtrer

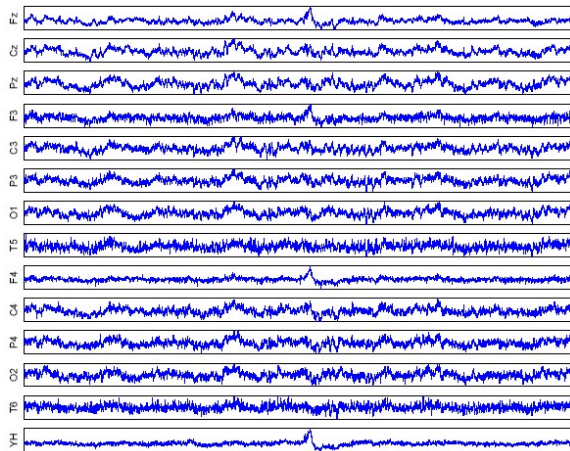
Filtrage des artefacts

- simple
- difficile
- presque impossible
- Environnement
 - Power line: notch filter
 - Electrode contact: histogram outliers
 - Physiologiques
 - Battements du cœur : filtrage fréquentiel
 - Clignements des yeux : ICA, PCA, filtrage fréquentiel
 - Activité de fond

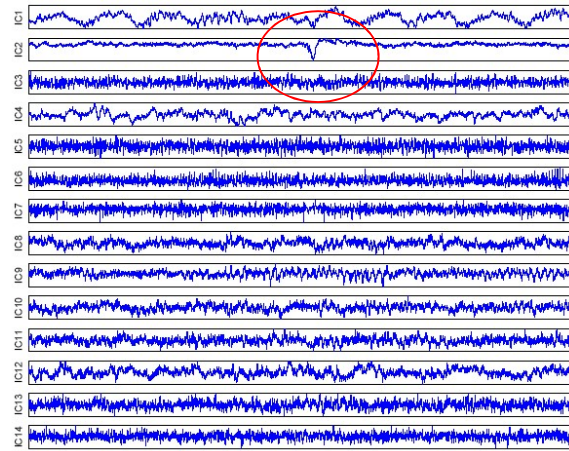


Nettoyage par ICA

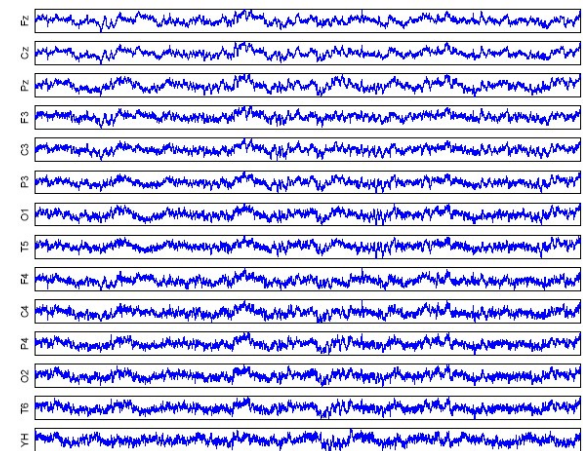
Élimination des clignements des yeux et activité musculaire par ICA



Signaux bruts



Sources identifiées



Signaux reconstruits

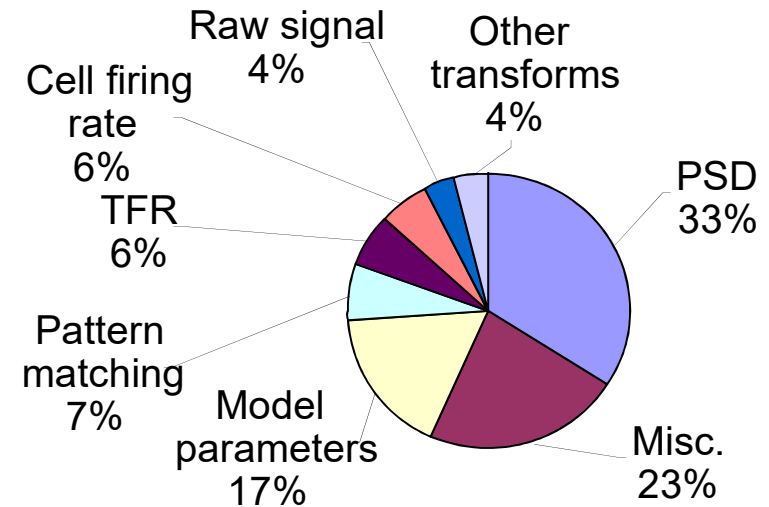
Extraction de caractéristiques

Caractéristiques EEG : spatiales, temporelles, fréquentielles

Ex: raw signals (amplitude), pattern matching (P300), PSD (MI), etc

Variabilité !

- Inter sujets
- Inter sessions



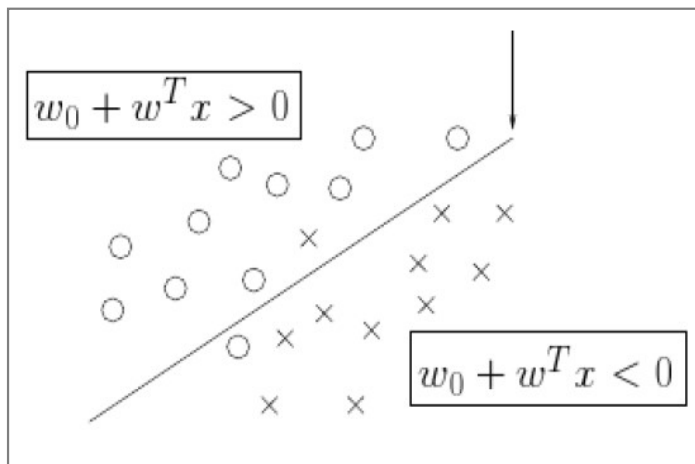
Extraction method	Time	Freq.	Space	Examples
Time -Frequency Representation	✓	✓	✓	STFT, wavelet
Cell firing rate	✓	✓	✓	-
Power Spectral Density	✗	✓	✓	Welch
Pattern matching	✓	✗	✓	Correlation
Raw signal	✓	✗	✓	Amplitude
Model parameters	✓	✗	✓	AR,AAR, Kalman
Other transforms	✓	✗	✓	ICA, PCA

Classification

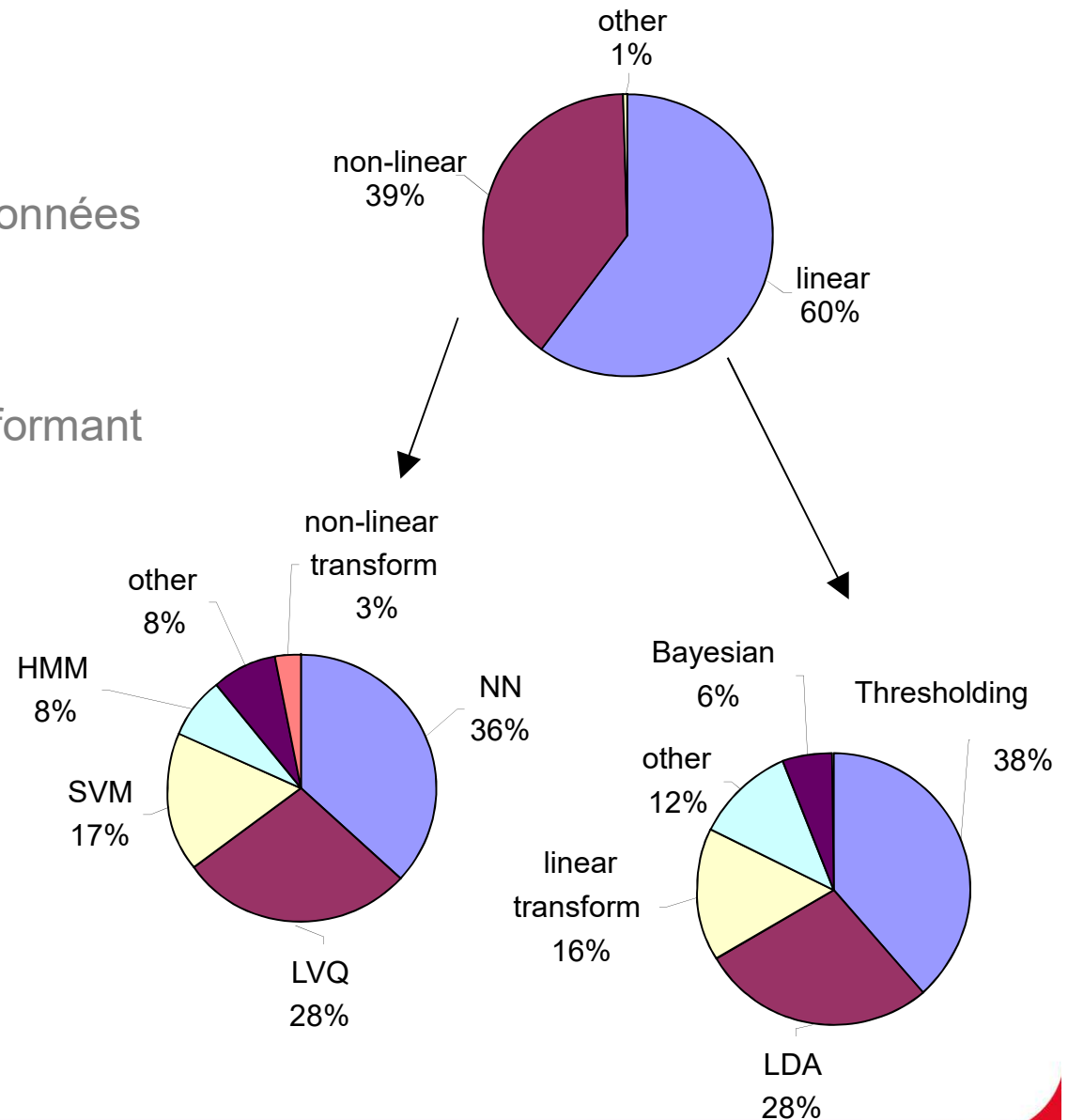
Supervisé : grand nombre de données d'apprentissage nécessaire

Exemples : LDA, NN, SVM, etc

Très ouvert car pas encore performant à 100%



LDA hyperplane ($N_{class} = 2$)

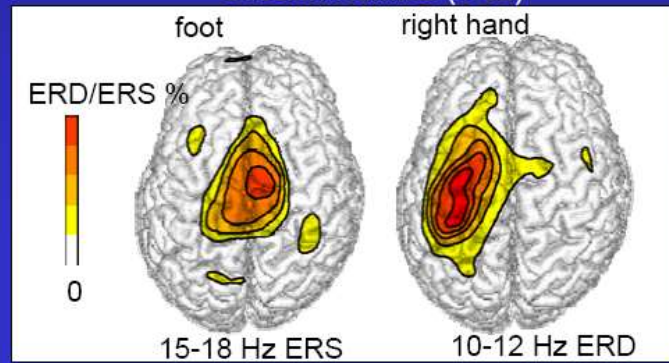




Exemples de BCI

Prothèses/Orthèses

BCI-based control of hand orthosis



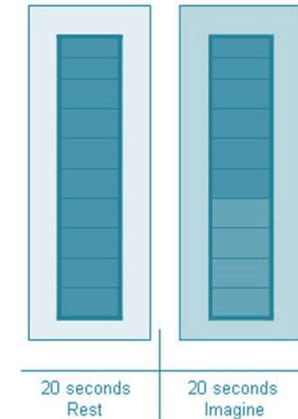
Tetraplegic patient, 22 years

Pfurtscheller et al. Neurosci Lett 2000

Neurofeedback

Apprentissage cérébral basé sur un feedback

Effet thérapeutique attendu :
épilepsie, déficits attentionnels,
dépression, troubles du sommeil,
stress post-traumatiques,
rééducation motrice, etc



« *Mind Mirror* » (Inria Rennes)



Divertissement



Jeux :

- Exemples : MindFlex (Mattel), Force Trainer (Lucas), MindBall (IP ProductLine)
- Tâche mentale et matériel simple (Concentration versus Relaxation)

Jeux vidéo :

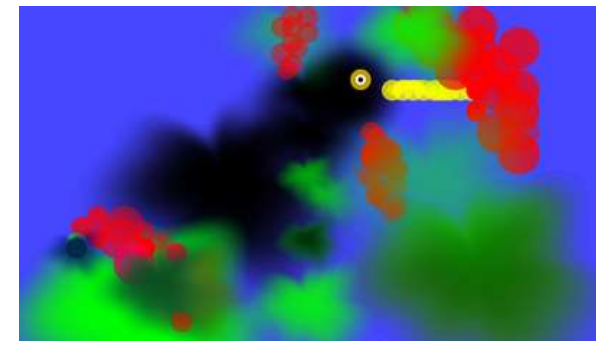
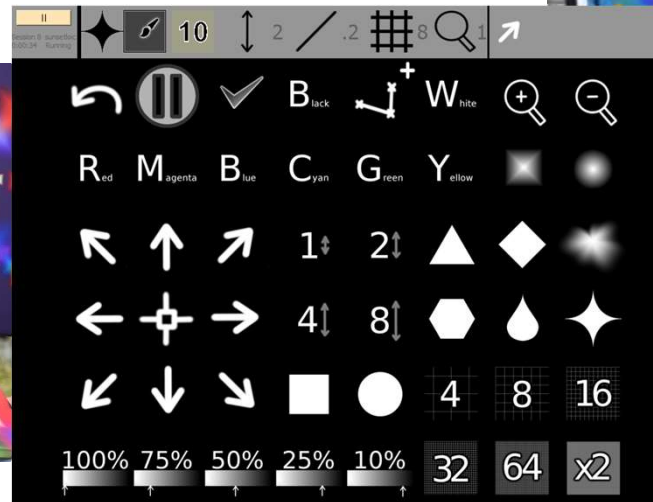
- Médicaux (serious games) ou recherche
- Commerciaux : Emotic, Hitachi, EmSense, NeuroSky



BrainPainting

<http://www.brainpainting.net>

(Chercheurs : Loic Botrel, Andrea Kubler)



Jürgen Thiele

Heide Pfützner

Contrôle





Et l'utilisateur ?

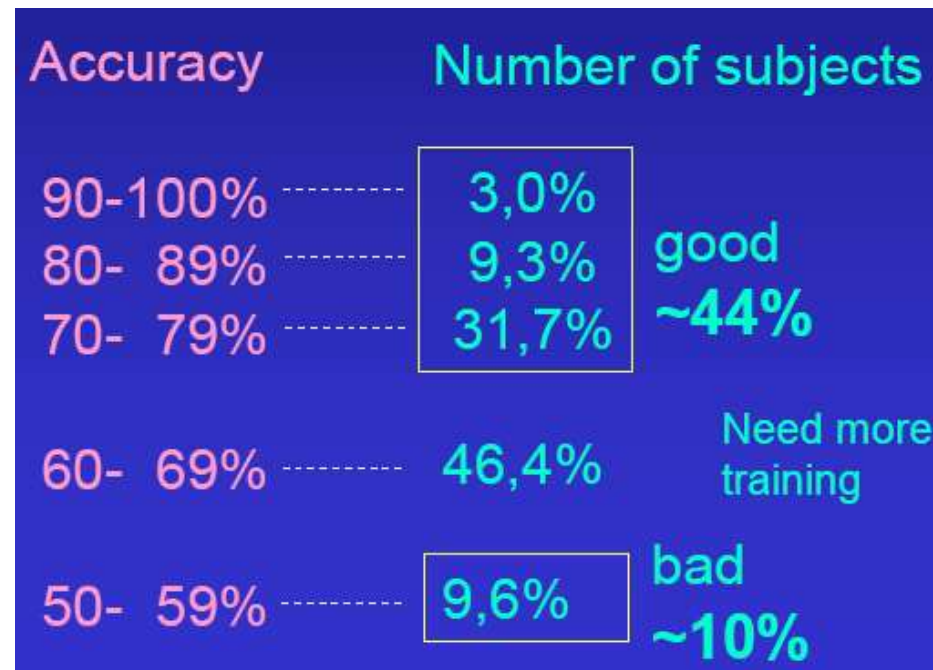
Variabilité des résultats

Exemple : Motor Imagery (Graz BCI) – Large Scale Study

Localisation : Graz University,

Population : 334 sujets (8-90 ans)

Protocole : imagination de mvts (main vs. pied; main gche vs. dte)



“Design BCI centré sur l'utilisateur” :

Critères d'évaluation pour chaque aspects de l'utilisabilité

Fiabilité Classifieur

Précision

% de réponses correctes

Performance BCI

Nombres d'information envoyées pour une durée de temps

Bits/min

Nombres d'informations correctes envoyées pour une durée de temps délimitée

Adjusted Bits/min

Satisfaction Utilisateur

Charge mentale

NASA-TLX (échelle)

Appréciation Générale

Quest 2.0 (échelle)

Utilisation en vie réelle

Single item

(Perrine Séguin,
CHU St Etienne)

NASA-TLX = NASA Task Load Index.

QUEST = Quebec User Evaluation of Satisfaction with Assistive Technology.

Adapted from Kübler et al, 2014

Bénéfices au niveau de « l'utilisabilité » handicap :

Les interfaces cerveaux-machine dédiée à la communication apportent-elles quelque chose en plus que les autres outils de communication améliorée et alternative ?

(Perrine Séguin,
CHU St Etienne)

Aujourd'hui, dans la très grande majorité des cas, **non**.

Bénéfice modéré prouvé seulement pour utilisateurs avec handicap moteur très sévère, et troubles oculomoteurs importants

Pour l'instant, la plupart des études, y compris celles très médiatisées, sont des « preuves de concept » :

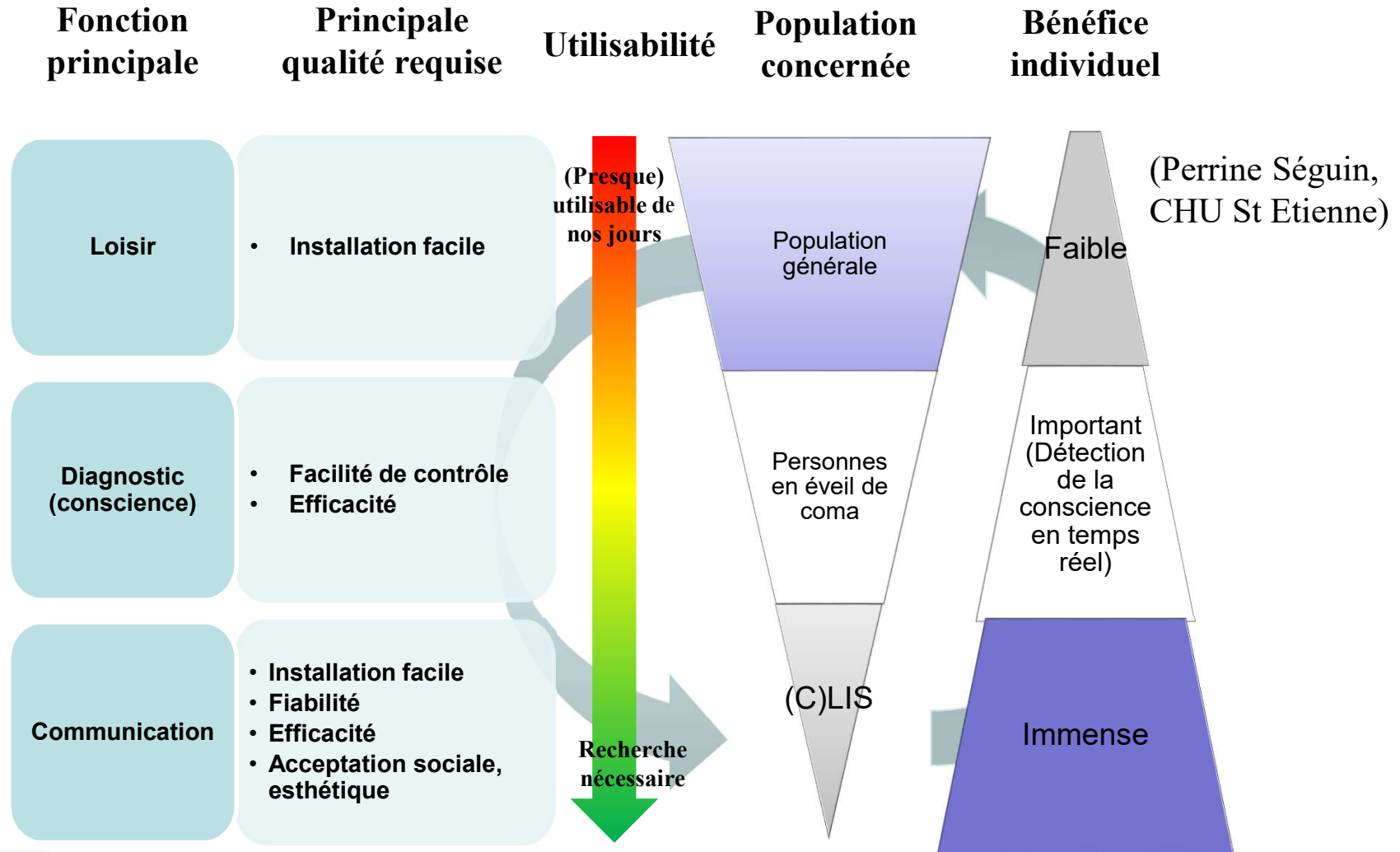
« Ma BCI marche » en gros, en gras, en titre

En détails : essais chez les sujets qui n'ont pas de handicap, ou pas très sévère, ou pas de comparaison avec les aides techniques existantes, et/ou avec des contraintes ingérables en vie réelle

On souhaiterait voir plus souvent :

« Ma BCI marche mieux que toutes les aides techniques qui existent, elle apporte un vrai **bénéfice** par rapport aux autres aides techniques, avec un minimum de **contraintes**, à quelqu'un qui est dans une situation de handicap très **importante**, dont le niveau d'atteinte est bien détaillé dans l'étude pour que vous sachiez spécifiquement quel profil de personne peut le plus en bénéficier »

Développement des interfaces cerveau-machine non-invasives : Différentes priorités selon la fonction* = différentes utilisabilités actuelles



Importance de la motivation et du feedback

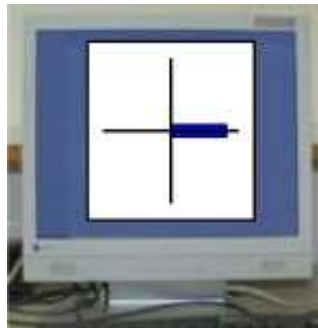
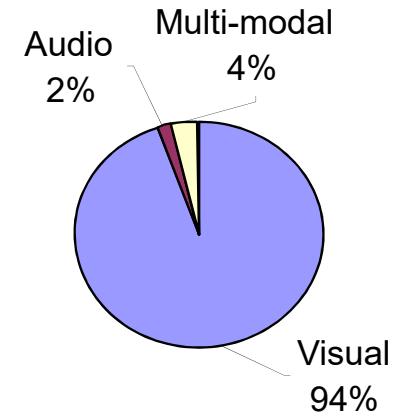
Effet du feedback

Augmente la motivation de l'utilisateur
Améliore les taux de reconnaissance

Type de feedback?

Discret vs. continu
Immédiat vs. retard

Efficacité dépend de la qualité du retour et des capacités de l'utilisateur



Barre: 90%



HMD: 92%



Cave: 95%

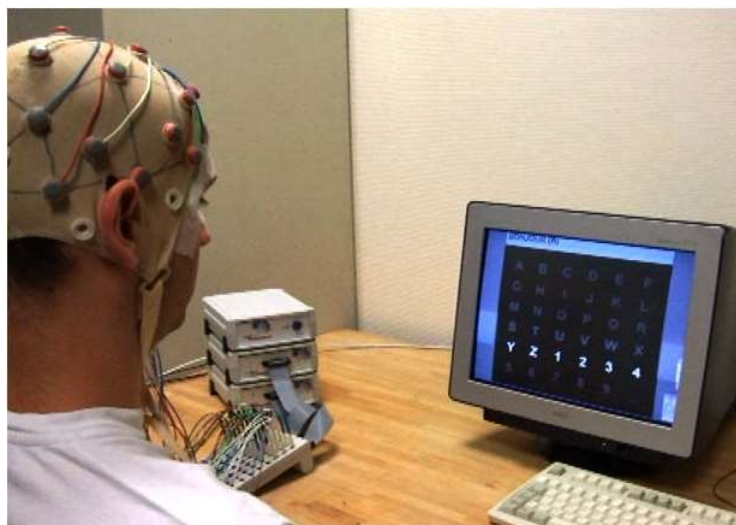
2 tâches mentales : précision
moy. sur 4 utilisateurs



Projets Français (2005-2016)

Projet OpenViBE1 (2005-2009)

Handicap – Logiciel open-source



Inria
INVENTEURS DU MONDE NUMÉRIQUE

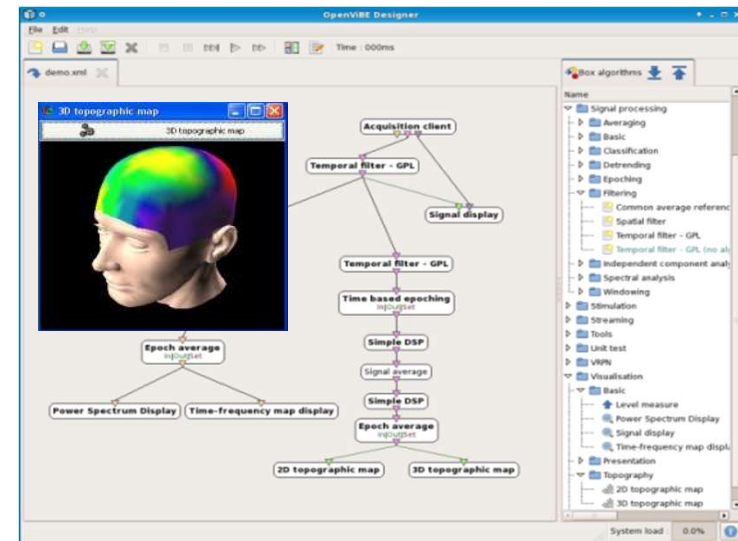


Inserm



Logiciel OpenViBE

- Logiciel standard pour les ICO
- Libre et gratuit
- Succès mondial
- Support Inria

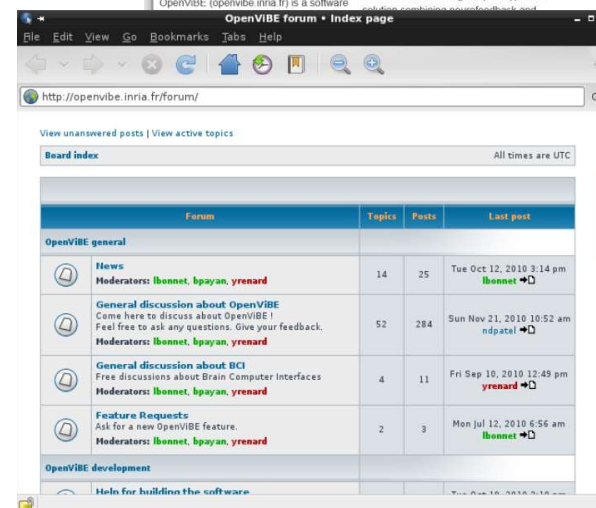
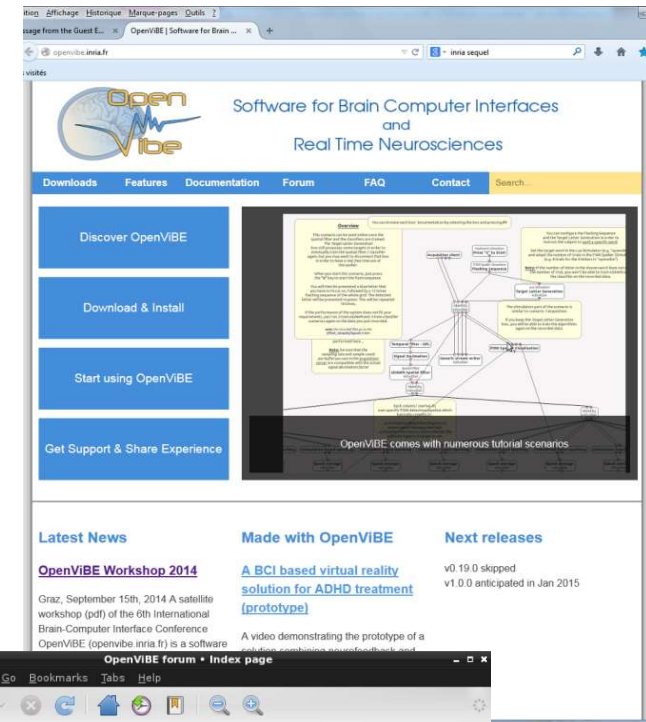


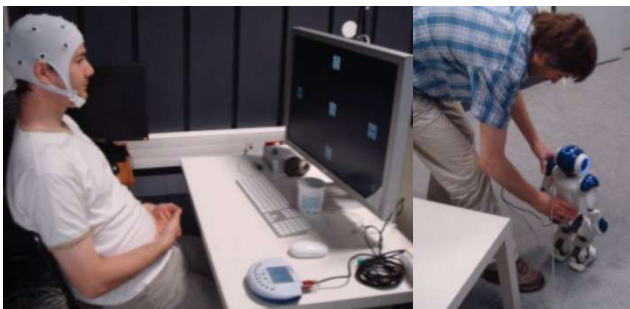
<http://openvibe.inria.fr>



OpenViBE key figures

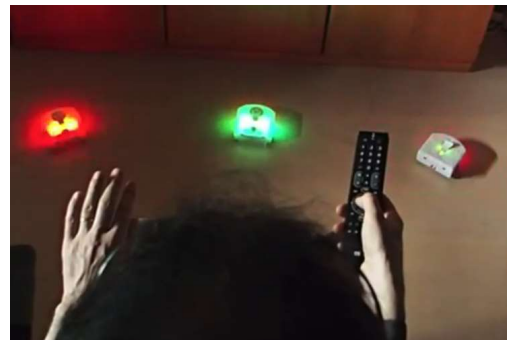
- ❖ Releases : ~30, version 3.0 (Oct. 2020)
- ❖ Website : ~170.000 page views / year
- ❖ Downloads : ~6.000 downloads/year
~ 80k total (since 2009)
- ❖ Forum members : ~1.000 users
- ❖ Forum posts : ~6.500 posts
- ❖ Citations : ~600+ citations
(OpenViBE paper, google scholar)
- ❖ Manpower : ~40 year.men
- ❖ Code : ~300k lines (C++)



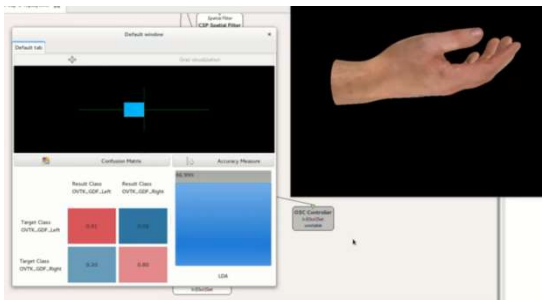


GIPSA - NAO robot control

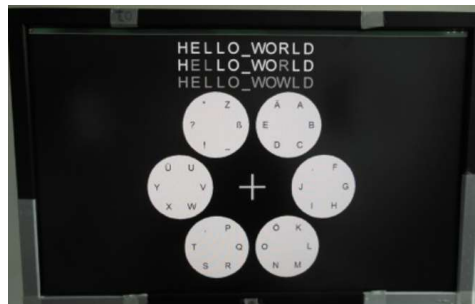
*made with
OpenViBE*



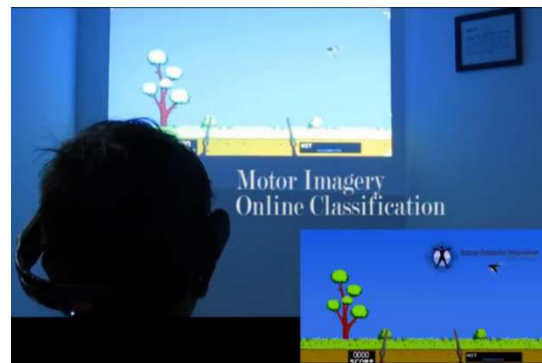
Thymio - Robotics



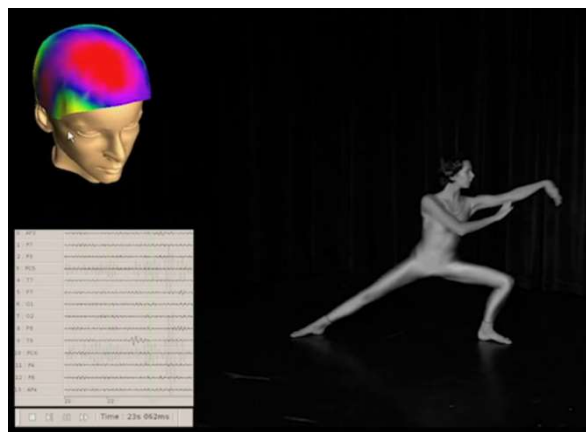
**Ozan Caglayan, Galatasaray University,
virtual hand feedback control**



**Pieter Jan Kindermans, Ghent
University, Unsupervised P300**



**Universidad Tecnológica de Pereira,
Colombia, BCI Duck Hunt game**



**μARTs@Work - Sofia's Brain Waves
Genesis**



**Nicoletta Caramia, University of
Pavia, Motor control studies**



**John Paul II Catholic University of Lublin, Psycho-
Neuro-Physiological Lab - Motor imagery**

Projet OpenViBE2 (2009-2013)

www.irisa.fr/vr4i/openvibe2

Jeux vidéo



HEMISFER Project (2013-2021)

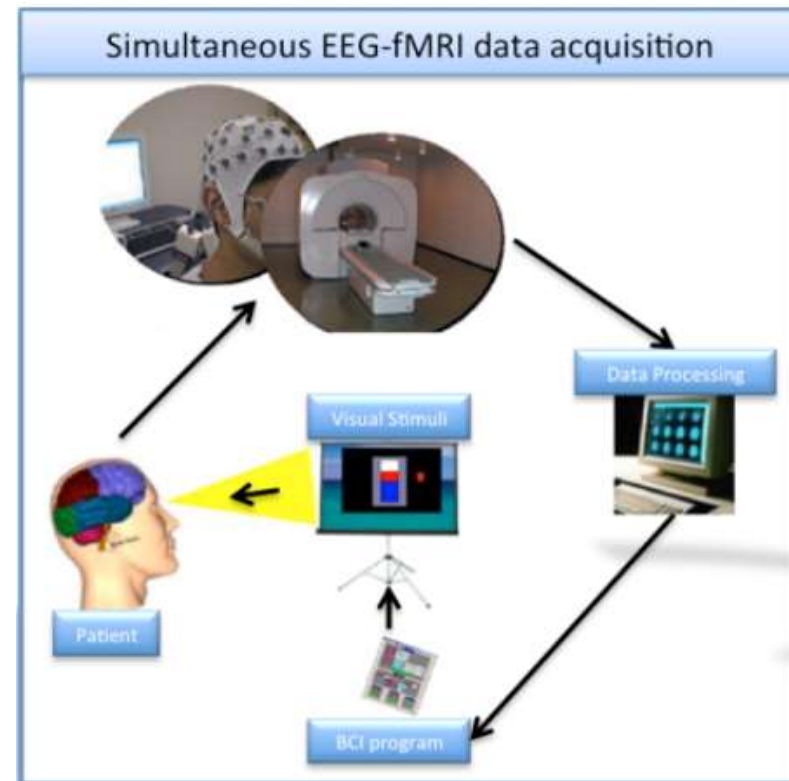
Neurofeedback et rééducation (IRM, EEG et RV)

Partenaires:

- **Inria** (Dr Anatole LECUYER, Dr Christian BARILLOT, Dr Pierre MAUREL),
- **CHU Rennes (réadaptation)** (Pr Isabelle BONAN)
- **CHGR Rennes (psychiatrie)** (Dr Jean-Marie BATAIL)

Pathologies :

- Déficiences motrices
- Troubles psychiatriques



Mensia Technologies



Start-up Française

- Nov. 2012 – Aout 2019
- Rachetée par *Cerebro*

Produits

- Applications médicales
- Neurofeedback (attention, douleur, etc)

Certification médicale (2018)

Evaluation clinique (2018)

Premier produit : Koala (Juin 2018)

<http://www.mensiatech.com/>



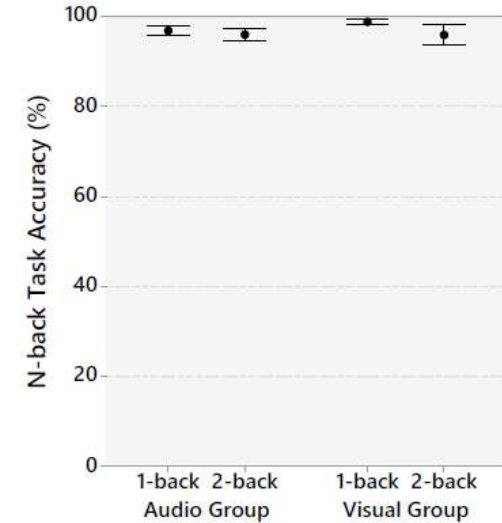
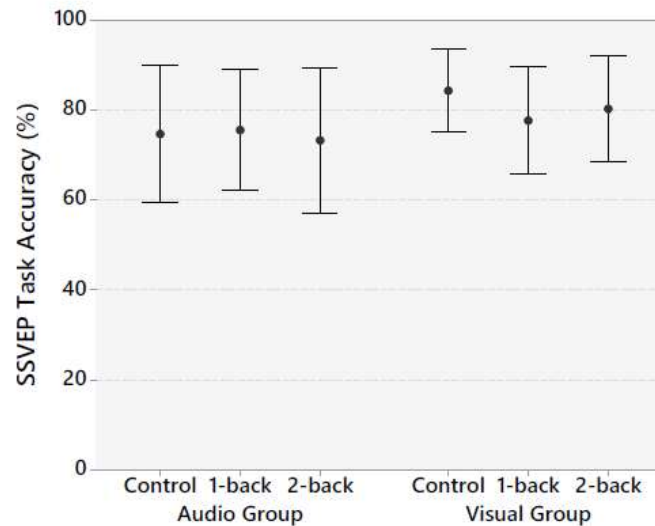
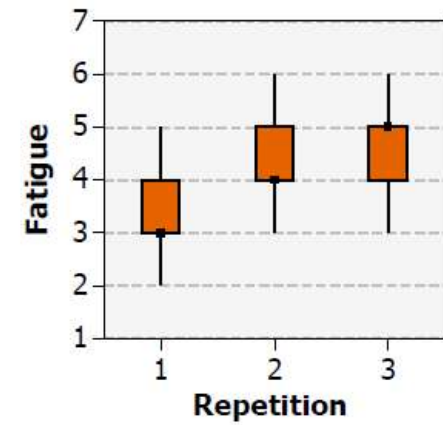
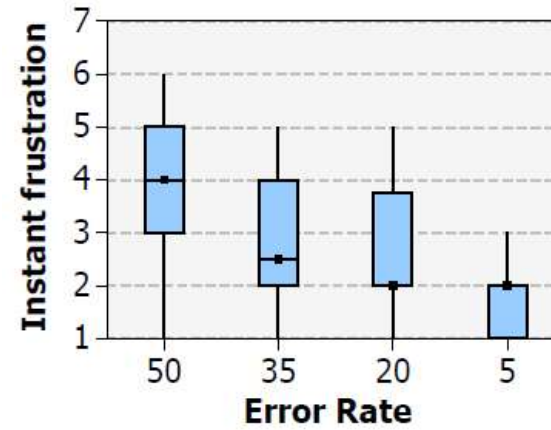


Résultats récents (>2013)

Expérience Utilisateur

Thèse Andéol Evain :

- Charge cognitive
- Frustration



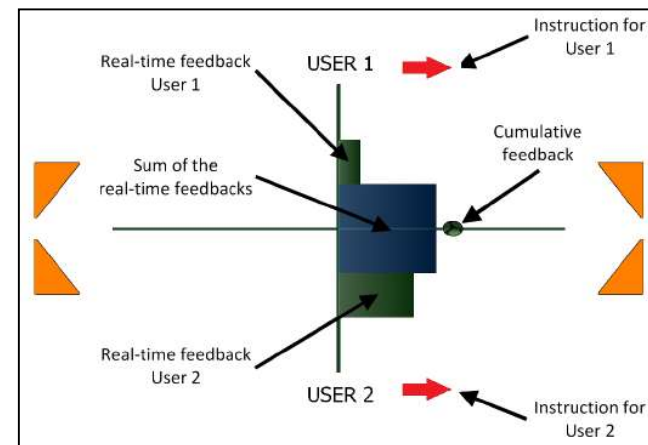
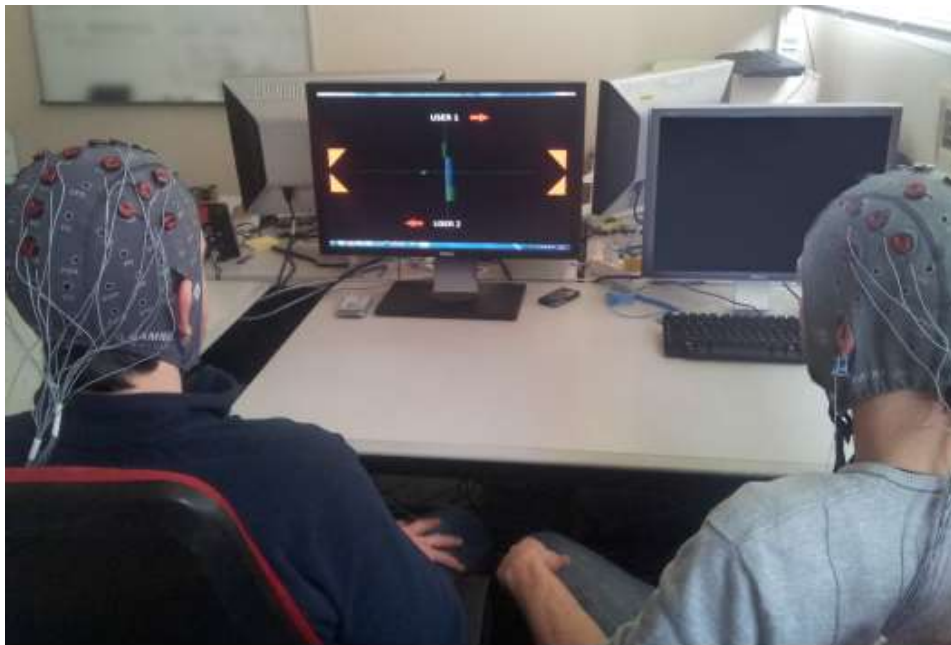
Evain et al. « Influence of Error Rate on Frustration of BCI Users », ACM AVI 2016

Evain et al. « Can I Think of Something else when Using a BCI? Cognitive Demand of an SSVEP-based BCI », ACM CHI 2017

Multi-utilisateurs et interaction sociales

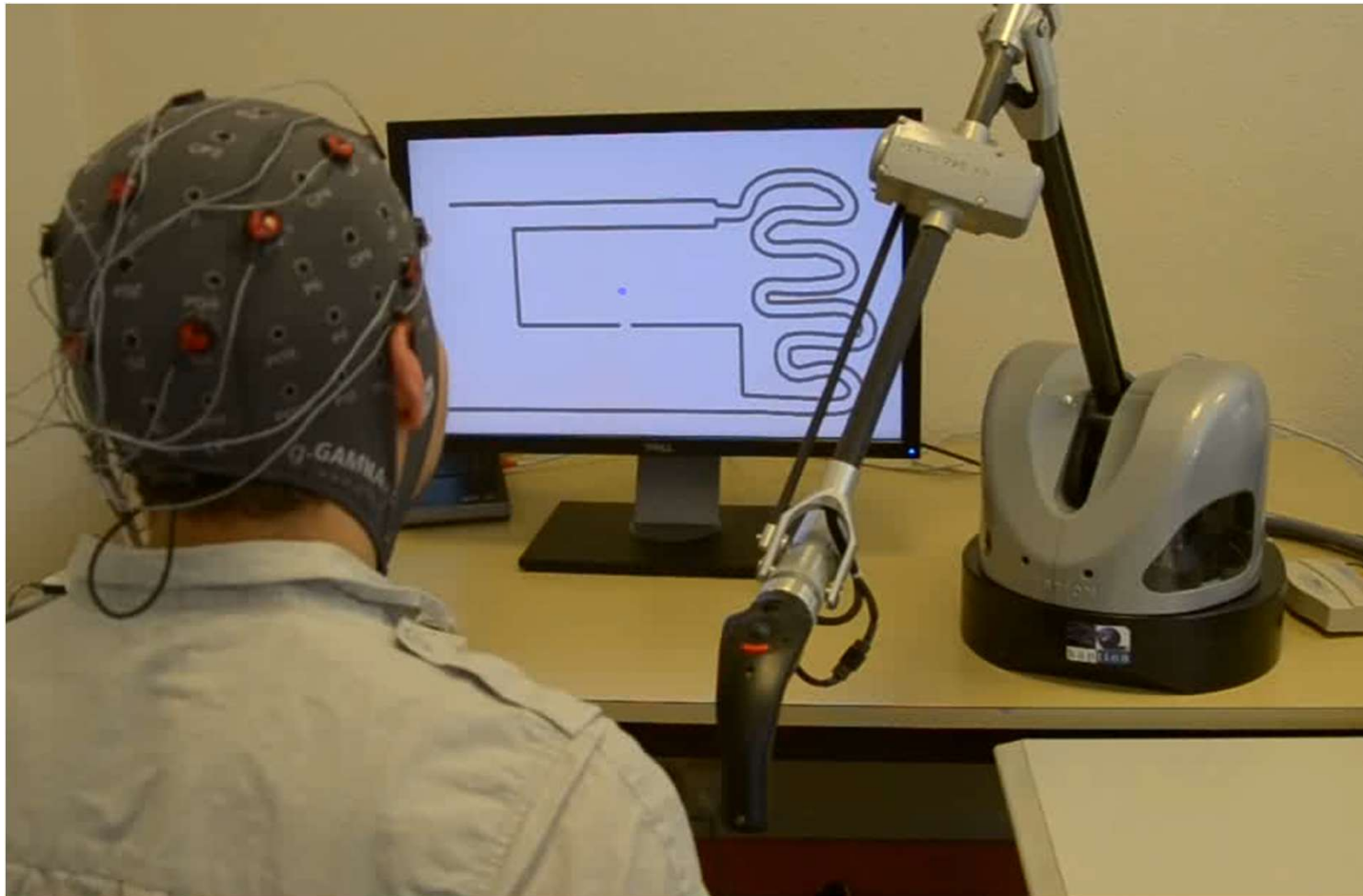
Video1 Compétition

Video2 Collaboration



L. Bonnet, F. Lotte, A. Lécuyer, *"Two Brains, One Game: Design and Evaluation of a Multi-User BCI Video Game Based on Motor Imagery"*, IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, 2013

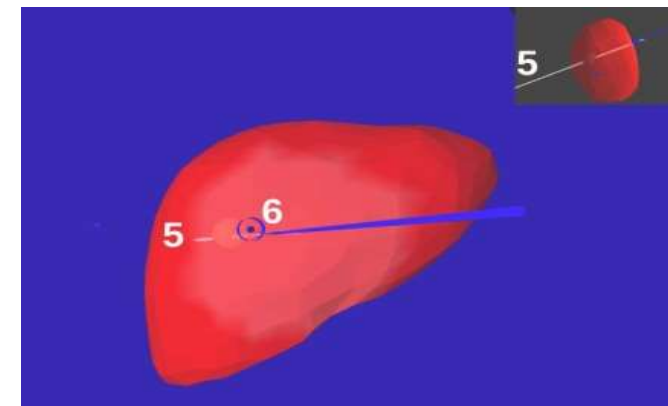
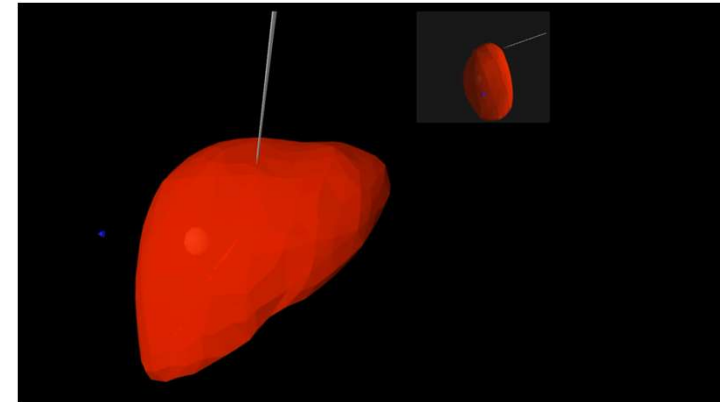
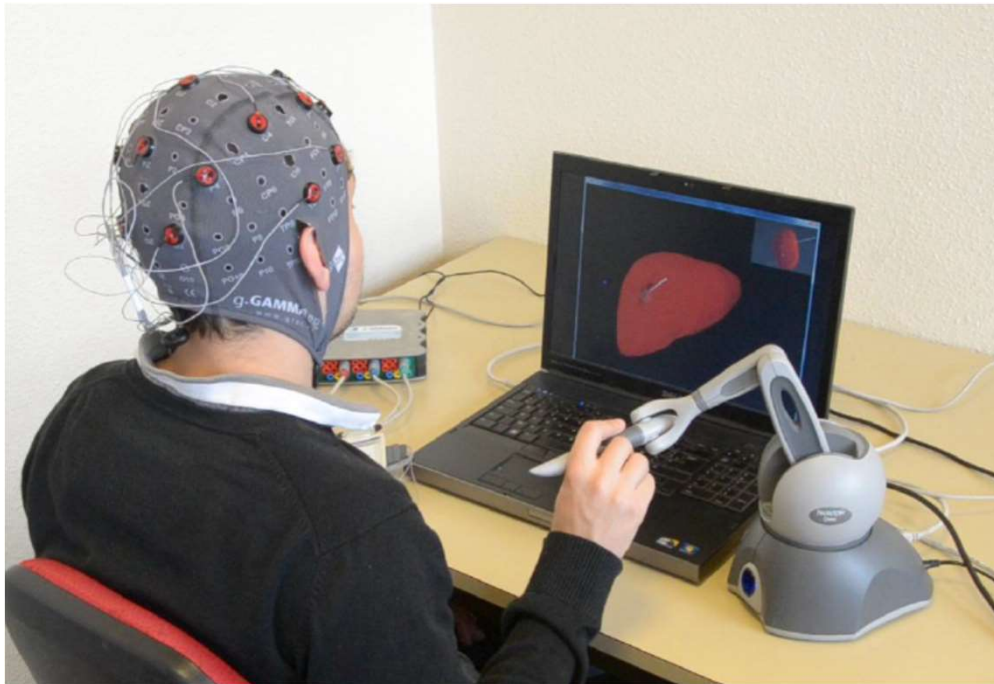
BCI and Haptics: Guidance system based on mental workload



L George, M Marchal, L Glondu, A Lécuyer. “Combining Brain-Computer Interfaces and Haptics: Detecting Mental Workload to Adapt Haptic Assistance”. *EuroHaptics*, 2012

(Eurohaptics 2012 Best Paper Award) // (BCI Award 2012 Nominee)

Application: Medical simulator



Anatole Lécuyer, Laurent George, Maud Marchal, *"Toward Adaptive VR Simulators Combining Visual, Haptic, and Brain-Computer Interfaces"*, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 33, Issue 5, pp. 18-23, 2013

BCI et « Réalité Augmentée »

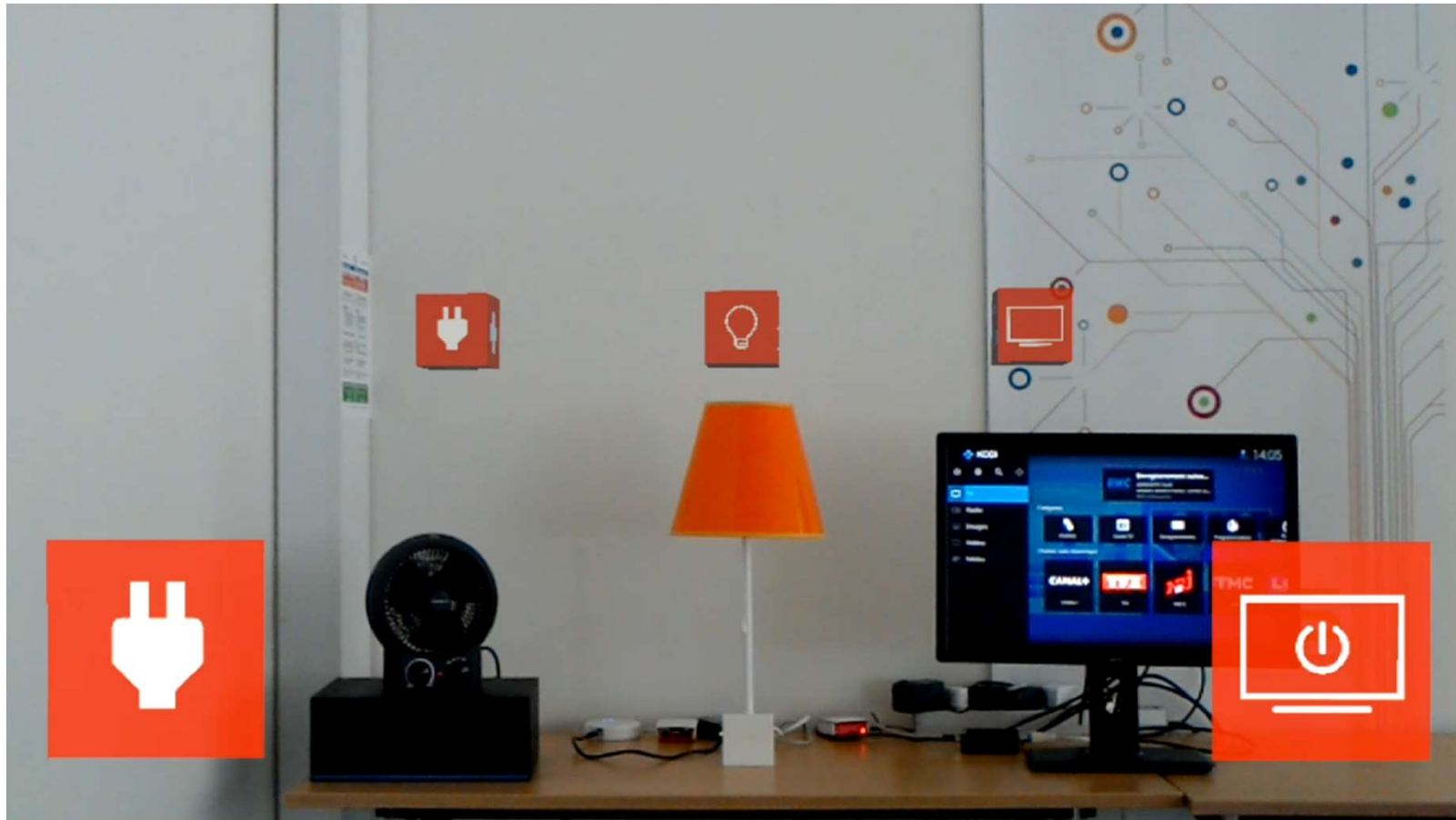


the « Mind-Window »
(ACM AH, 2015)



Robot control in AR
(IEEE TVCG, 2018)

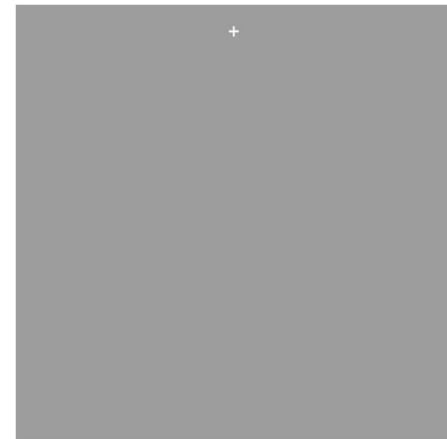
Application: Smart home



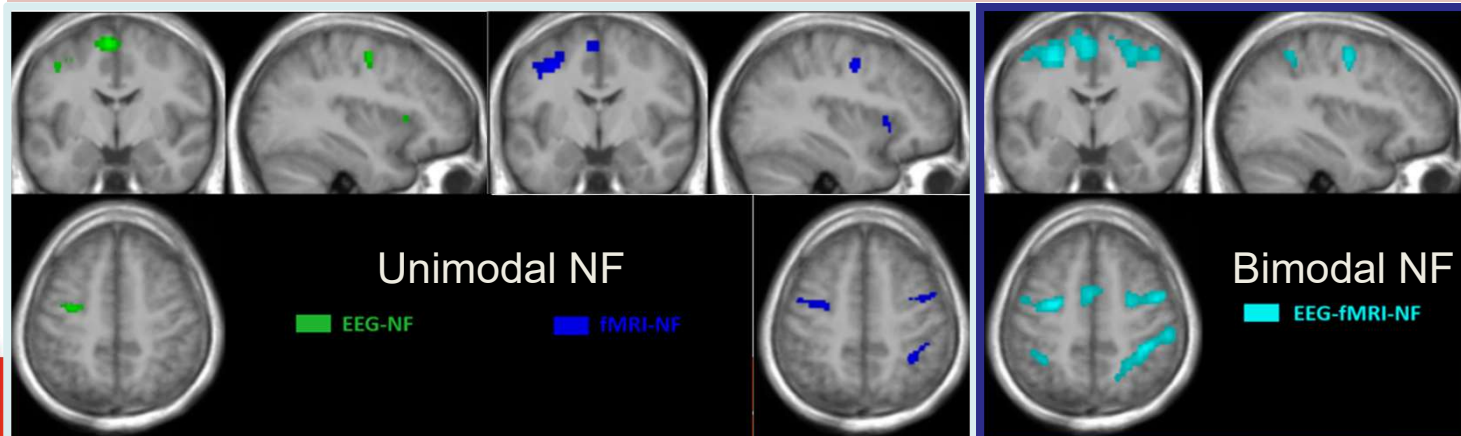
Multimodal Neurofeedback: EEG and fMRI



Neurinfo



<https://team.inria.fr/empenn/research/scientific-activities/hemisfer-projects/>



Pour finir..



Anatole Lécuyer, Laurent George, Maud Marchal, "*Toward Adaptive VR Simulators Combining Visual, Haptic, and Brain-Computer Interfaces*", IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 33, Issue 5, pp. 18-23, 2013

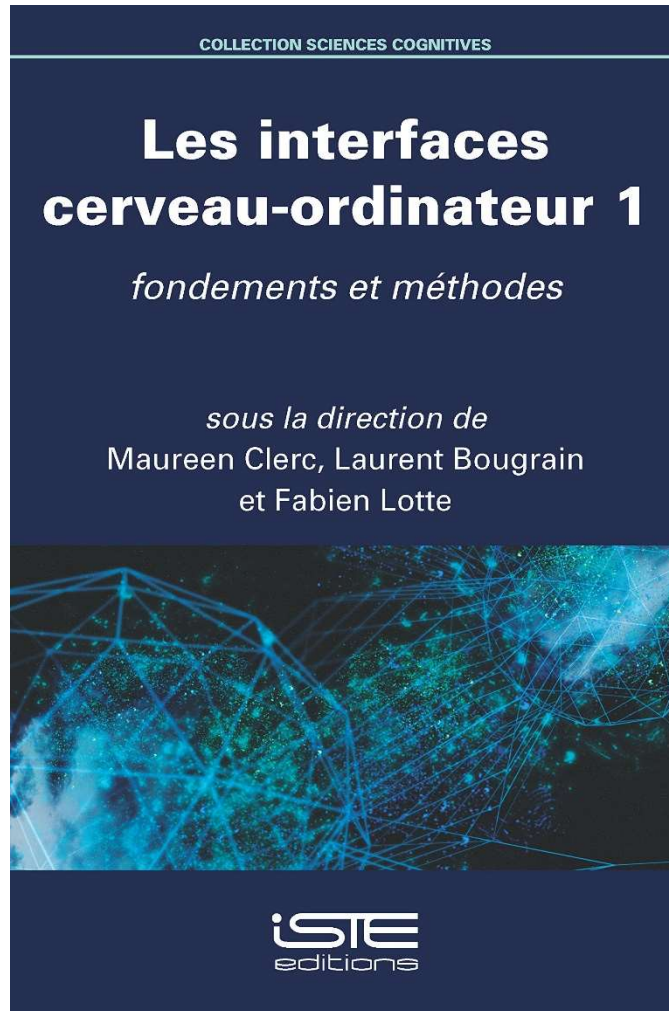
Bilan ?

- ✓ Des prototypes impressionnants existent
- ✓ Un défi scientifique pluridisciplinaire :
 - ✓ neuroscience,
 - ✓ électronique,
 - ✓ traitement de signal,
 - ✓ Interaction homme-machine
 - ✓ transfert clinique
- ✓ Applications nombreuses : handicap, rééducation, multimédia
- ✓ Domaine de recherche très actif : USA, Allemagne, Japon, etc
- ✓ Domaine de recherche de plus en plus actif en France (Hybrid)
- ✓ Pour aller plus loin ? (slides suivants)



Pour aller plus loin..

Ouvrage collectif (2016)



Pour aller encore plus loin..

Sociétés savantes



CORTICO

COLlectif pour la Recherche
Transdisciplinaire sur les Interfaces
Cerveau-Ordinateur

Association loi 1901 qui a pour but de
créer des synergies favorisant
l'avancement des recherches,
développements et usages relatifs aux
interfaces cerveau-ordinateur (ICO).

Président : François Cabestaing

www.cortico.fr

NEXT

Section de l'Association Française de
Psychiatrie Biologique et de
Neuropsychopharmacologie (AFPBN)

Section pour promouvoir l'évaluation et
encadrer l'utilisation rigoureuse des
techniques de neurofeedback en
psychiatrie.

Représentants : DR Jean-marie Batail
(Rennes), Dr Jean-Arthur Miccoulaud-
Franchi (Bordeaux)

<https://www.afpbn.org/sections/next/>

Master 2 SIF - Option VRI
Univ Rennes



Interactions en RV:
interfaces cerveau-ordinateur
et interfaces haptiques

Anatole Lécuyer (Inria)

anatole.lecuyer@inria.fr