



Colloque du 8 novembre 2018
de France Traumatisme Crânien
Association nationale des professionnels
au service des traumatisés crâniens

Interface cerveau-machine : faire face aux challenges soulevés par les études cliniques

Perrine Séguin

Médecin en Médecine Physique et de Réadaptation, Saint-Etienne

Master 2 en Bio-ingénierie et Innovation en Neurosciences, Paris

Recherches en collaboration avec le Centre de Recherche en Neurosciences de Lyon

Sommaire

- I. Présentation générale des interfaces cerveau-machine
- II. Focus sur les interfaces cerveau-machine dédiée à la communication et au diagnostic
- III. Comment évaluer « l'utilisabilité » d'une interface cerveau-machine ?
- IV. Perspectives futures : faire face aux challenges
- V. Challenges éthiques

I. Présentation générale des interfaces cerveau-machine

A. Définition

B. Méthodes de recueil du signal cérébral / Comparatif

C. Classification selon la fonction

Interface cerveau-machine

4

Connexion directe

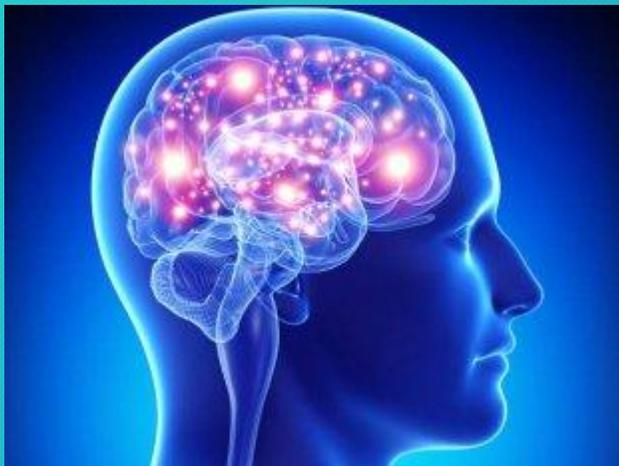


Image : Berkeley Lab



Agir sur son environnement
Hochberg, Donoghue et al., Nature, 2012.



Communiquer

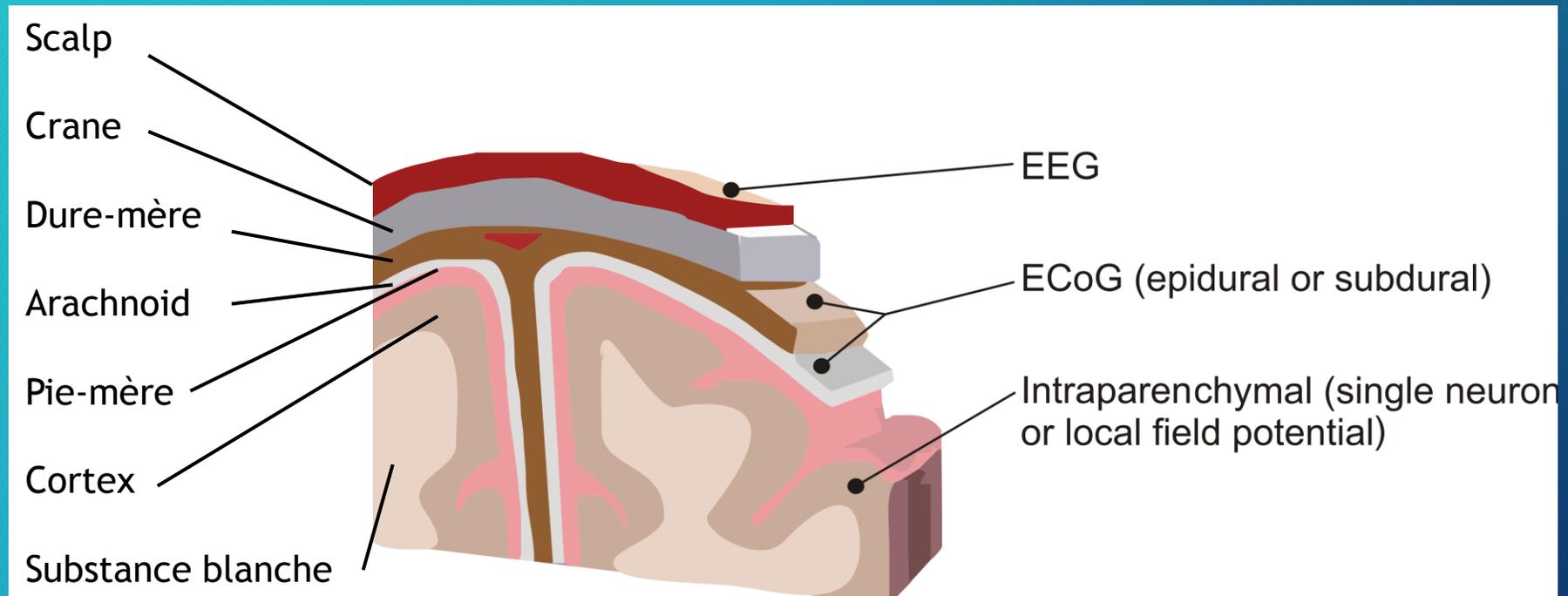
Etc.

Feedback

I. Présentation générale

B. Méthodes de recueil du signal cérébral

- Plusieurs méthodes pour recueillir le signal cérébral :
 - Invasives :
 - Electrodes implantées soit dans le cortex cérébral, soit sous la dure-mère, soit sur la dure mère.



Exemple : Invasives



Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm.
Hochberg, Donoghue et al., Nature, 2012.



Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human.
Aflalo, Andersen et al., 2015

I. Présentation générale

B. Méthodes de recueil du signal cérébral

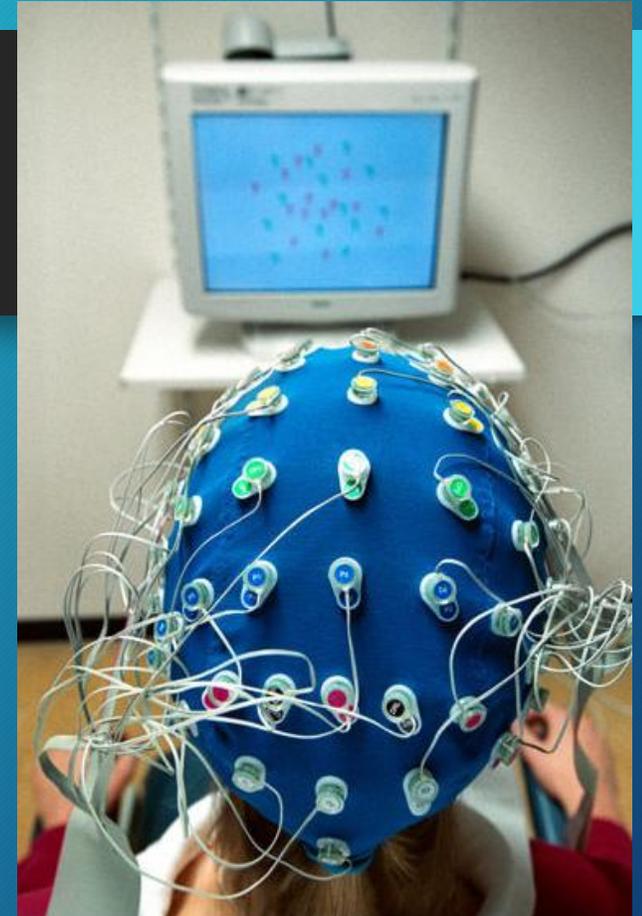
- Non invasives :
 - Electro-encéphalogramme (EEG)
 - Near Infra-red spectroscopy
 - (Imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle = IRMf)



NIRS (cr : HTLAB)



IRM (cr : La sciencecpourtous /cafésience)



EEG (cr : Futura-sciences.com)

Comparatif entre les interfaces invasives et non-invasives

Invasives

- **Avantages :**
 - Très bonne qualité de signal
 - Donc meilleure performance et fiabilité (plus rapide, plus grand nombre de commandes disponibles, charge mentale moins élevée car tâche plus intuitive)
- **Inconvénients :**
 - Risques liés à la neurochirurgie et au matériel implanté (anesthésie, hémorragie, infections, ...)
 - Utilisation confinée dans un environnement spécialisé
 - Réaction immunitaire contre les électrodes : variable, diminue efficacité des électrodes

Non invasives

- **Avantages :**
 - Aucun risque
 - Portatif (de + en +)
- **Inconvénients**
 - Mauvaise qualité du signal
 - Donc moins rapide, moins de commandes, « charge mentale » plus importante
 - Durée de maintien des électrodes limitée
 - Aspect esthétique non optimal
 - Nécessité d'un tiers pour la pose des électrodes + mise en place du système
 - Lourdeur de la mise en place

Interfaces cerveaux-machines : classification selon la fonction

- **Loisirs** : jeux, multimédia, loisirs créatifs
- **Recherche en neurosciences et neuroréhabilitation** :
 - **Neurofeedback** :
 - Rééducation des troubles attentionnels
 - Rééducation motrice
 - **Communication** : verbale, non verbale
 - **Diagnostique** : détection de la conscience, bilan neuropsychologique, ...
 - **Supplémentation motrice** : exosquelettes, stimulation électrique fonctionnelle, commande d'un fauteuil roulant, ...

II. Focus sur les interfaces cerveaux-machines dédiées à la communication et au diagnostic

- A. Grands principes de fonctionnement : contrôle attentionnel
- B. Etudes cliniques : BCI & Locked-in syndrome
- C. Etudes cliniques : BCI & EVC-EPR

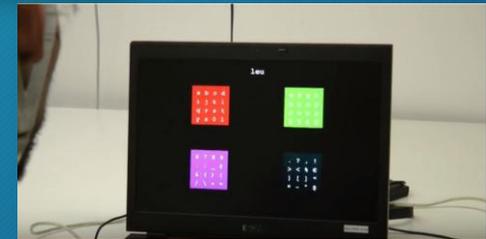
II. Interfaces cerveau-machine dédiées à la communication

A. Grands principes de fonctionnement

1. Non-invasives

- « **Synchrones** » = **exogènes** : on se concentre sur un **signal extérieur**

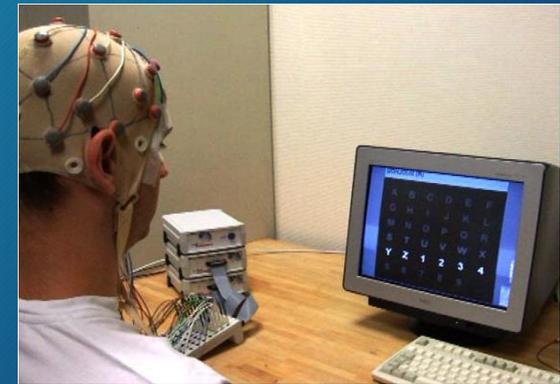
- Ex : on doit se concentrer sur l'image qu'on veut sélectionner, et essayer d'ignorer les autres signaux
 - P300
 - Steady-state visual ou potentiels évoqués auditifs



- **Endogènes** : on génère un **signal intérieur**

- Ex. :

- Imagination motrice (peut être fait en EEG ou en NIRS)
- On cherche à « faire le vide » dans son esprit, ...



Exemple Non-invasive : P300-speller

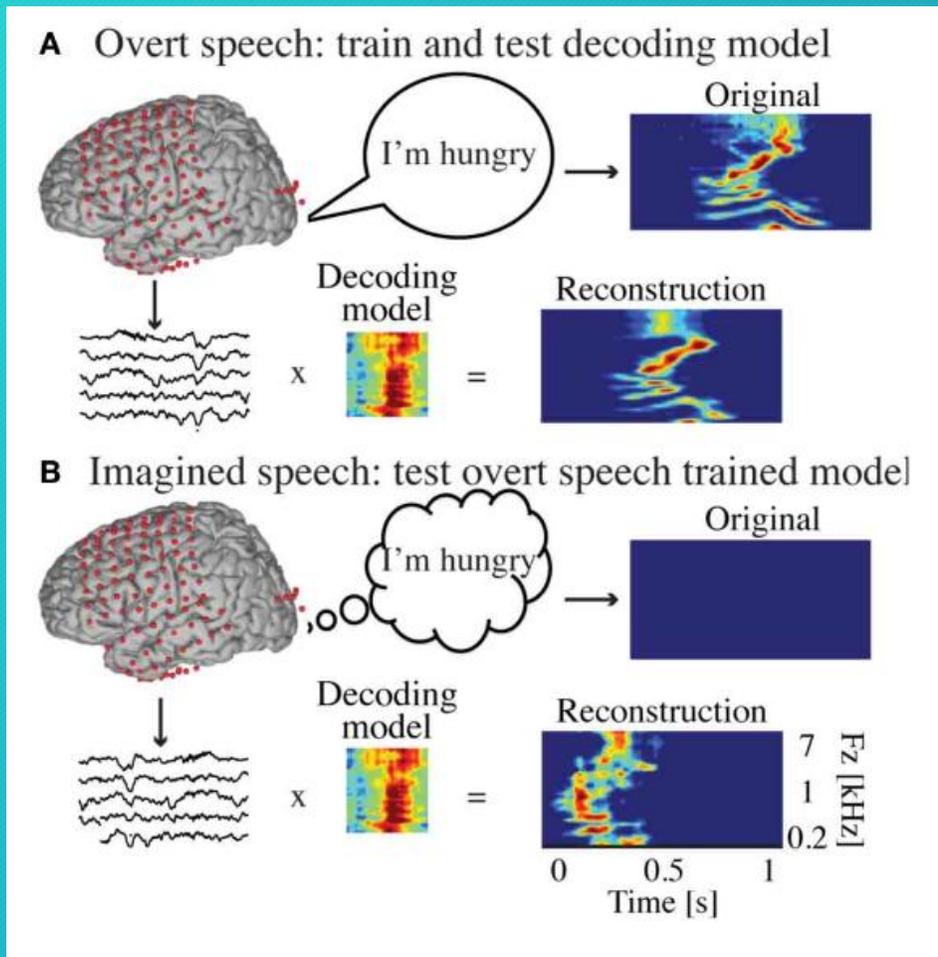


Centre de
recherche en
Neurosciences
de Lyon

II. Interfaces cerveaux-machines dédiées à la communication

A. Grands principes de fonctionnement

1. Invasives



- 7 personnes avec une épilepsie réfractaire ont un implant d'électrocorticographie
- Lecture d'un texte à voix haute puis du même texte à voix basse

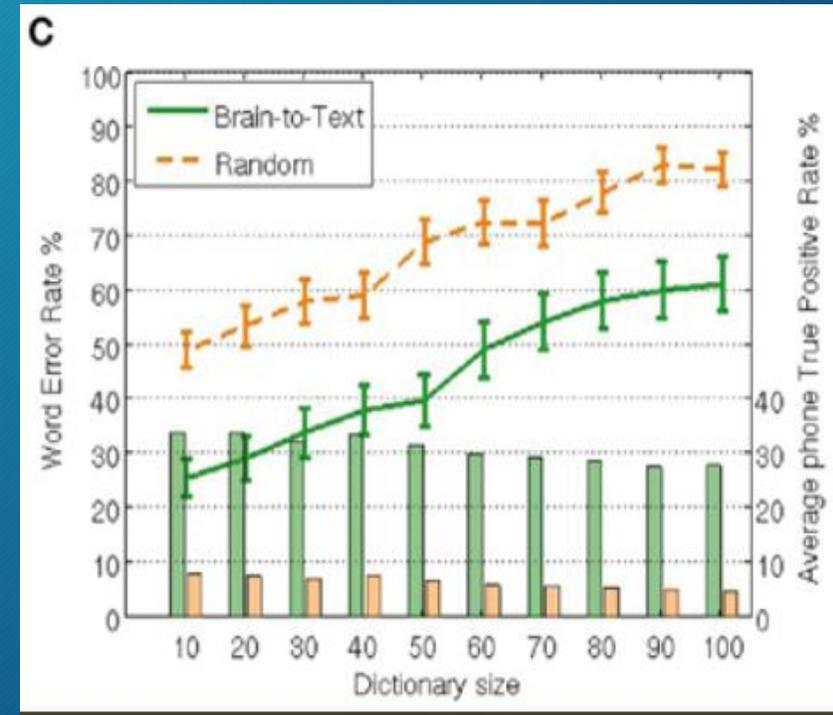
“Decoding spectrotemporal features of overt and covert speech from the human cortex.”
Martin et al, 2014 ; USA

II. Interfaces cerveaux-machines dédiées à la communication

A. Grands principes de fonctionnement

1. Invasives

- Résultats :
 - Quand le sujet dit les mots à haute voix, la machine est à peu près capable de reconstruire le signal
 - Quand le sujet lit « dans sa tête », la machine fait beaucoup d'erreurs, presque autant que si on génère un signal au hasard
- Autre étude de la même équipe :
 - Herff et al, 2015 : 7 personnes avec épilepsie. Lecture à voix haute. Pour 30 mots de vocabulaire, on a environ 33% de taux d'erreurs de mots (le hasard a 57% de taux d'erreurs). Pas encore en temps -réel, mais semble possible.



II. Interfaces cerveaux-machines dédiées à la communication

B. Etudes cliniques : BCI & Locked-in syndrome

- Interfaces cerveaux-machine visuelles (P300 ou steady-states evoked potential)
 - Montrent une baisse drastique des performances chez une proportion importante de sujets LIS par rapport aux sujets sains
 - Maby et al, 2010, HBM conference
 - 20 volontaires sains (4,8 correcte sélection/minute) vs 1 patiente LIS (0,6 cor. Sel. /min)
 - Wolpaw et al, 2018 : 39 patients ALS avancés éligibles, 9 n'ont pas un ctrl BCI >70%, et 6 autres vont ensuite abandonner l'usage car pas assez bon ctrl
- Motor imagery
 - idem

II. Interfaces cerveaux-machines dédiées à la communication

B. Etudes cliniques : BCI & Locked-in syndrome

16

Question: « Est-ce que Paris est la capitale de la France ? »

ou

Instruction : « Portez votre attention sur le coté droit, en essayant de compter les « oui » plus longs »

Contrôle de l'interface
cerveau-machine

Son
« Non »

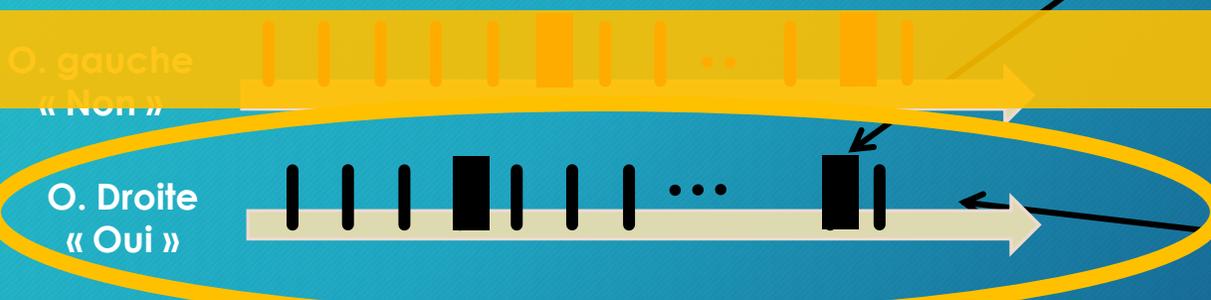


Son
« Oui »



Déviant en durée
150ms (x 6)

Flux sonores



Son standard
100ms (x 30)

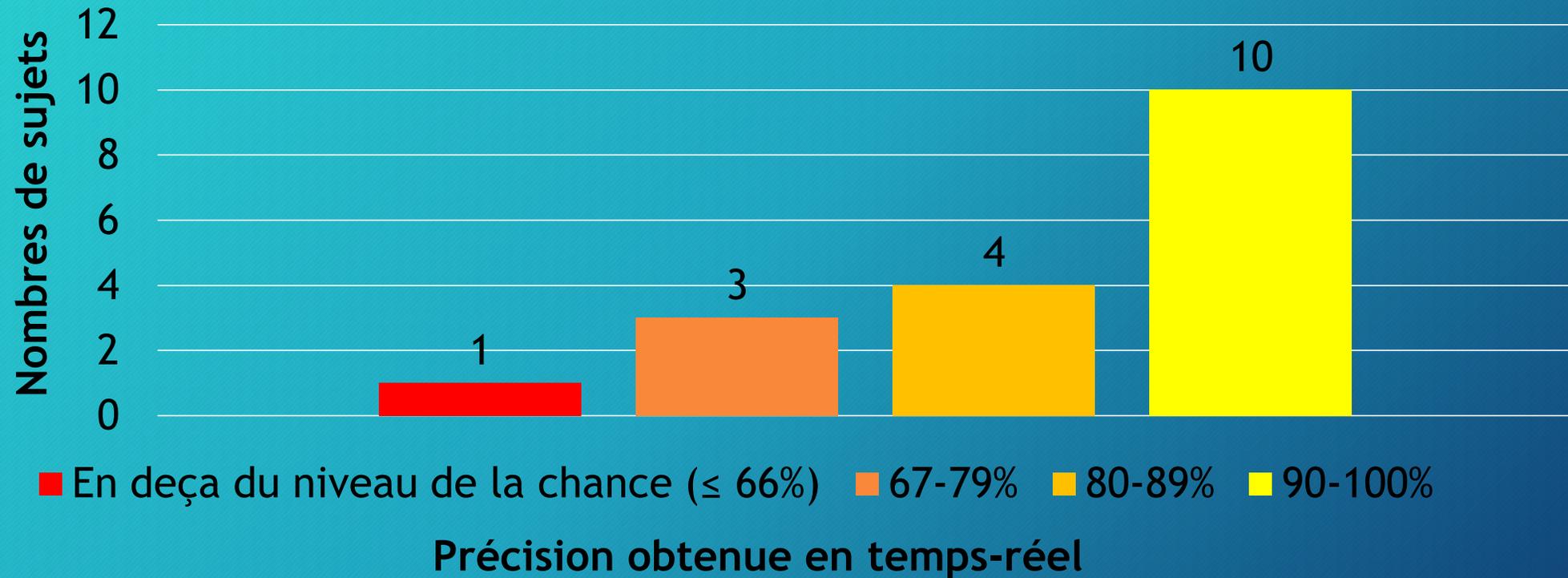
-18 sujets sains
- 3 LIS, 4 ALS

1 essai : environ 18 secondes pour les sujets sains, et jusqu'à 36 s pour une patiente

Séguin et al.,
in prep

Résultats : 18 sujets sains

17



Caractéristiques cliniques des patients

18

N°	ETIOLOGY OR ONSET	AGE	PATHOLOGY DURATION	COMMUNICATION CODE	ALS-FR SCALE
LIS1	AVC (hémorragique)	60	3 ans	Code Oui/Non avec les yeux, code alphabétique, pas de système high-tech	/
LIS2	Trauma	35	3 ans	Code Oui/Non avec les yeux, code alphabétique, pas de système high-tech	/
LIS3	Ischémie (post-traumatique)	63	32 ans	Code Oui/Non avec les yeux, code alphabétique, eye-tracker et contacteur sur la joue	/
ALS1	Bulbaire	53	6 ans	Code Oui-Non avec la tête, contacteur sur la joue	17/48
ALS2	Spinale	31	5 ans	Code Oui-Non avec les yeux de fiabilité variable, eye-tracker envisagé	0/48
ALS3	Spinale	55	4 ans	Code Oui-Non avec la tête, code alphabétique par pointage avec laser, pas d'autre système high-tech	18/48
ALS4	Spinale	60	25 ans	Phonation (interprétation par l'auxiliaire de vie), eye-tracker	23/48

Résultats : Etude 2 (7 patients)

A. Temps-réel versus offline

19

	Contrôle en temps-réel	Contrôle offline
LIS 1	-	-
LIS 2	-	-
LIS 3	-	-
ALS 1	-	+ : 70 %
ALS 2	-	-
ALS 3	+ : 100 %	+ : 97 %
ALS 4	+ : 100%	+ : 100 %

- 2 patients sur 7 ont contrôlé l'interface en temps-réel
- 1 patient s'est avéré avoir présenté un contrôle de l'interface « *offline* », après nettoyage du signal par ICA

	Année	Code	Type stim	Standards	Deviants	LIS	Disorders of consciousness	Trial duration	Accuracy (healthy subjects)	Accuracy (patients)
Sellers et al (offline)	2006	“Yes”, “No”, “End”, “Pass”	Speech		x	4 SLA	0	2min20s	<i>Not comparable (offline)</i> (40 trials)	
Pokorny et al.	2013	Yes/no	Pure tones		x	0	12	30 sec	69% - 83% (80 instructions)	
Lulé et al.	2013	“Yes”, “No”, “End”, “Pass”	Speech		x	2	13	1 min	73+/-23% (12 questions)	60% in one LIS patient
Hill et al.	2014	Yes/no	Yes/no vs beep, stereo	x	?	2 SLA	0	15 sec	76,9 % +/-11,1 (100 questions)	
Our study	2015	Yes/no	Speech, stereo	x	x	7		18 sec	17 répondeurs/ 18 86 % +/-11 (50 questions)	2 répondeurs (ALS) à 100%/7

Les déficiences qui peuvent gêner l'appareillage

22

Cognitives ?

- Vigilance
- Attention
- Langage
- Mémoire
- Thymie
- Orientation
- Troubles exécutifs ...

Sensorielles

- Vision
- Audition
- Tactile

Osteo-articulaires

- Installation

Autres

- Mouvements réflexes
- Douleur
- Risques d'escarres
- respiratoires

II. Interfaces cerveaux-machines dédiées à la communication

C. Etudes cliniques : BCI & EVC-EPR

Auteurs	Année	Tache		BCI temps réel	Nb répondeurs EVC-EPR/total
Cruse et al, Goldfine et al,	2011 & 2012-2013	Imagination motrice main et orteil	16 UWS	non	3/16 puis ré-analyse > 1/16
Coyle et al, (DECODER workshop)	2012	Imagination motrice	1 MCS	oui	Case report (80 %)
Lule et al,	2013	P300 (“Yes”, “No”, “End”, “Pass”)	13 MCS, 3 UWS	oui	0/16
Pan et al,	2014	P300 + ssVEP	4 VS, 3 MCS, 1 LIS		1 VS, 1 MCS, 1 LIS
Wang et al,	2017	P300 audio+visuelle	8 UWS, 5 MCS		4 UWS, 4VS
Feuvrier et al	In prep	P300			

III. Comment évaluer « l'utilisabilité » d'une interface cerveau-machine ?

“Design centré sur l'utilisateur” : Critères d'évaluation pour chaque aspects de l'utilisabilité

Fiabilité	Précision	% de réponses correctes
Performances	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	Charge mentale	NASA-TLX (échelle)
	Générale	Quest 2.0 (échelle)
	Utilisation en vie réelle	Single item

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

- Aujourd'hui, dans la très grande majorité des cas, non.
- Bénéfice modéré seulement pour utilisateurs avec handicap moteur sévère (mais pas trop ...). Pour l'instant, la plupart des études, y compris celles très médiatisées, sont des « preuves de concept » :
 - « Mon ICM 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 :
 - Des études longitudinales
 - « Mon ICM 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 »
 - Wolpaw et al, Neurology, 2018

Bénéfices au niveau de « l'utilisabilité » :
Les interfaces cerveaux-machine dédiée au diagnostic apportent-elles quelque chose en plus que les protocoles EEG actifs ?

- Pas d'études comparatives EEG versus ICM
- Pas d'études longitudinales
- Les ICM ont pour l'instant plus de contraintes en terme logistiques + de compétences mobilisées en temps-réel

IV. Perspectives futures

IV. Perspectives futures ?

Améliorations technologiques :
captation du signal,
traitement du signal,
intelligence artificielle

Renforcement de la pluridisciplinarité :
ingénieurs,
neuroscientifiques, soignants,
rééducateurs, ...

Implication des utilisateurs potentiels
plus en amont des projets,
design « centré sur l'utilisateur »

Futur ?

Interface cerveau-machine utilisable en vie réelle,
par des personnes en situation de handicap

Perspectives futures ?

Amélioration technologiques des capteurs des signaux cérébraux

Non invasifs



Emotiv Epoc ; Australie et USA



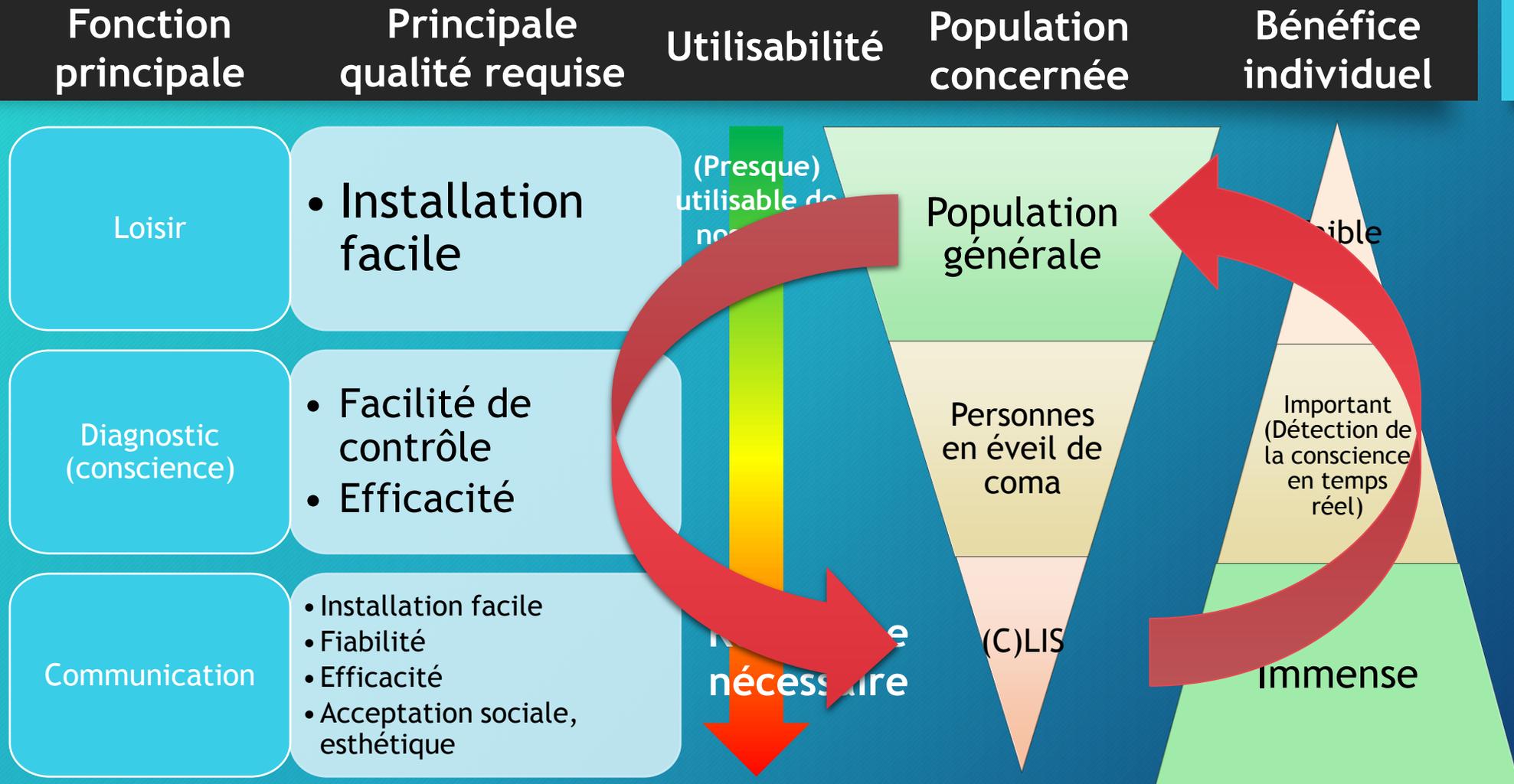
Ear-EEG project,
Imperial College of London



Debener et al., 2015 ; Allemagne
(NB : Utilisation d'un smartphone pour générer les stimulation et recueillir le signal)

Invasifs : amélioration de la tolérance, transfert des informations à distance

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



* Schéma inspiré des revues de Millàn et al., 2010 ; Kübler et al, 2014 ; Nijboer et al., 2015

IV. Perspectives futures ?

- Utiliser des ICM « passives » avec des signaux corrélés au niveau de conscience (sWI, ...) en monitoring sur 24 h
 - Permettrait de cibler les meilleures périodes pour réaliser les évaluations de conscience, les essais de communication, voir à terme les stimulations médicamenteuses ou électriques

V. Challenges éthiques

A . Challenges éthiques communs avec les autres outils de communications améliorées et alternatives

- risque que la machine s'exprime à la place du patient car pas de « stop » quand le patient s'arrête de communiquer ou que le signal devient mauvais ou que le patient n'est plus conscient;

Amélioration urgente : Permettre un STOP automatique ou volontaire de l'ICM quand le signal n'est plus interprétable

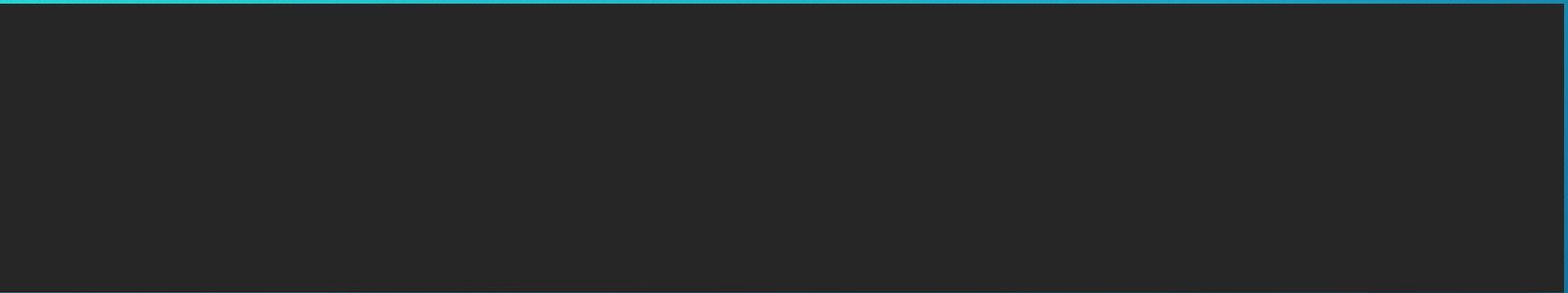
- pourquoi répéter 10 fois la même question de la même manière n'est pas une bonne idée : risque de la mauvaise compréhension du « niveau du hasard »
- Intermédiaire technologique qui interfère avec la relation directe de sujet à sujet (orientation des regards sur l'écran)

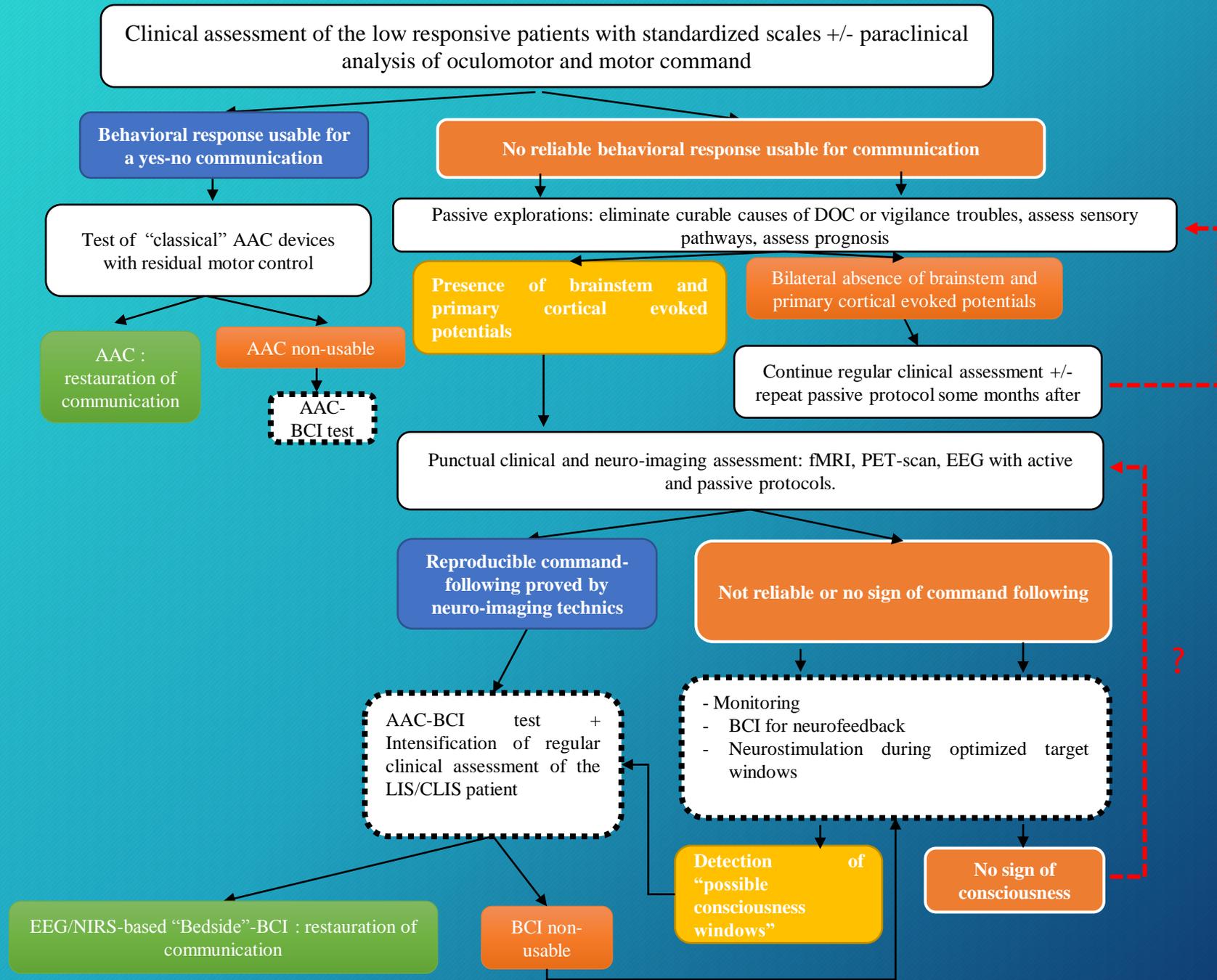
B. Les nouveaux challenges soulevés par les BCI

- Ethique de la médiatisation des études BCI
 - Dérives
- A suivre ...

Remerciements

- Centre de Recherche en Neurosciences de Lyon :
 - Dr Jérémie Mattout
 - Dr Emmanuel Maby
 - Dr Dominique Morlet
- CHU de Saint-Etienne :
 - Pr Pascal Giraux
- CHU de Lyon :
 - Pr Jacques Luauté
- Master 2 en Bio-ingénierie et Innovation en Neurosciences
 - Dr André Klarsfeld
 - Dr Pierre-Paul Vidal
 - Dr François Vialatte
- Pr A. Yelnik
- Plateforme Nouvelles Technologies de l'hôpital Raymond Poincaré
 - Delphine Arnaud
 - Salvador Cabanilles
 - Samuel Pouplin
- ALIS :
 - Véronique Blandin
 - Frédéric Pellas
- Tous les co-investigateurs de l'étude EVA ...
- Organisateurs du colloque FTC

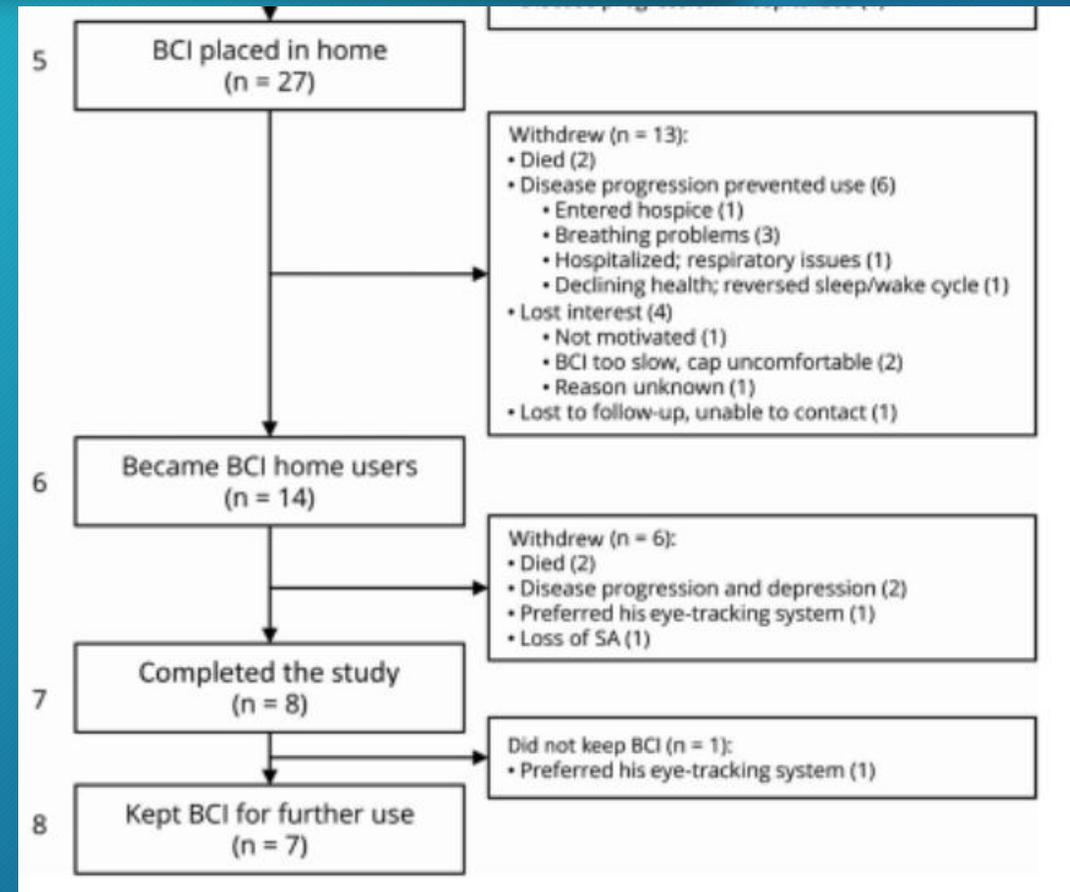
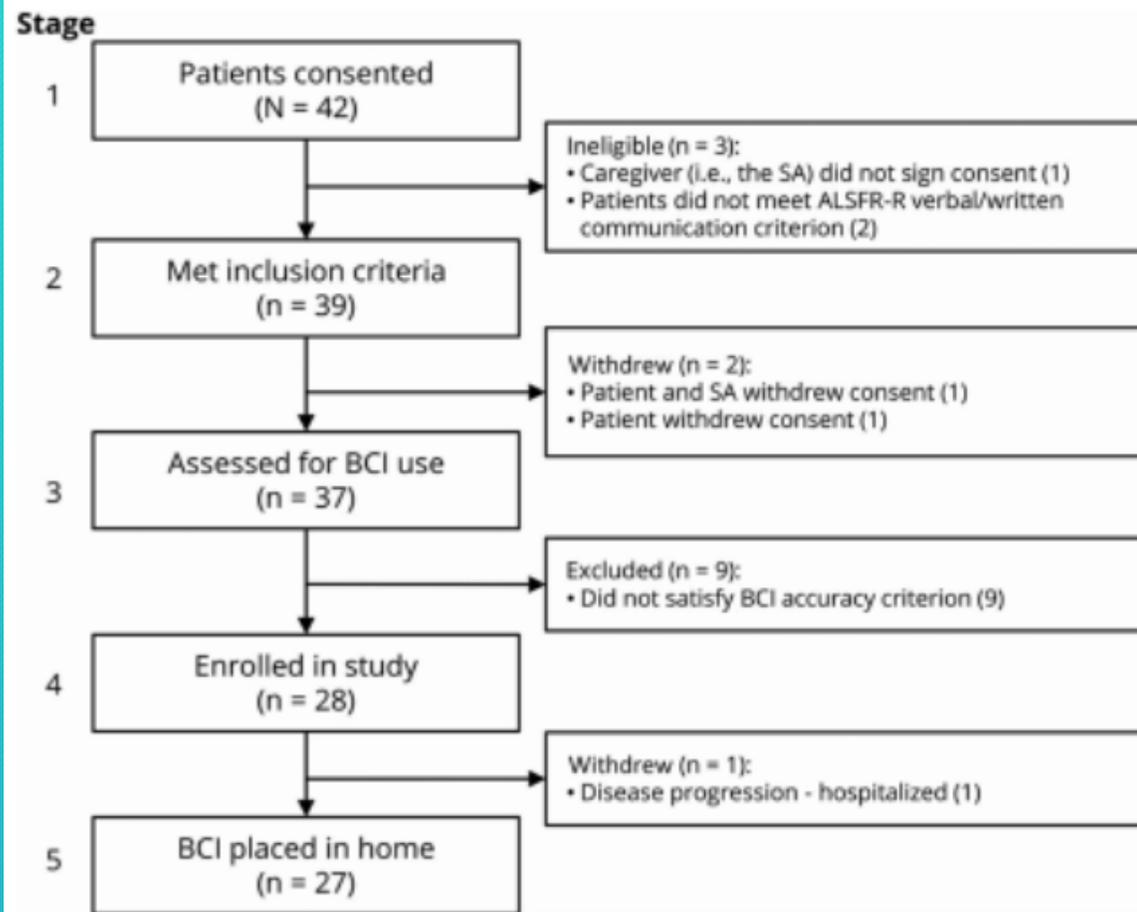




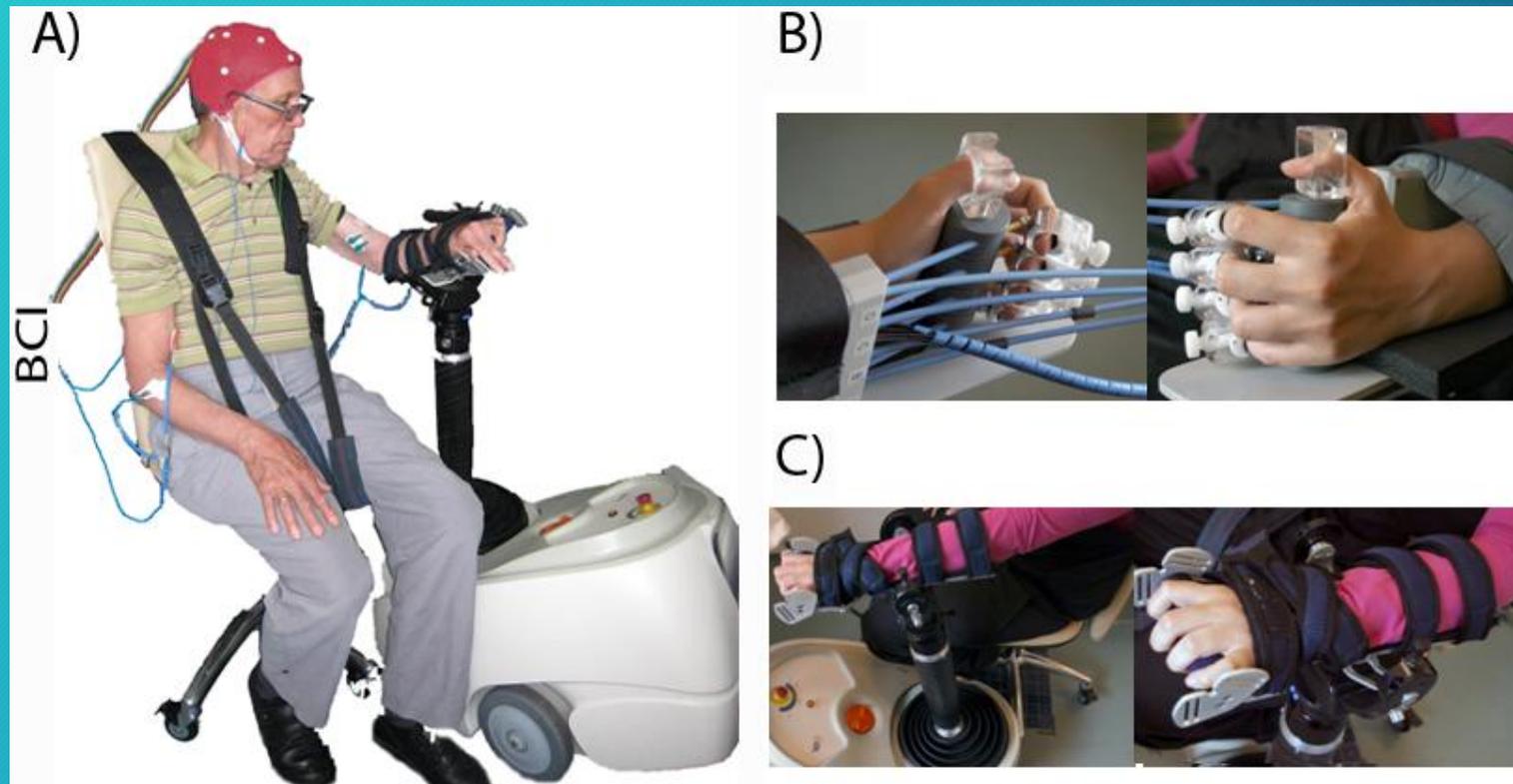
?

?

Wolpaw et al, 2018

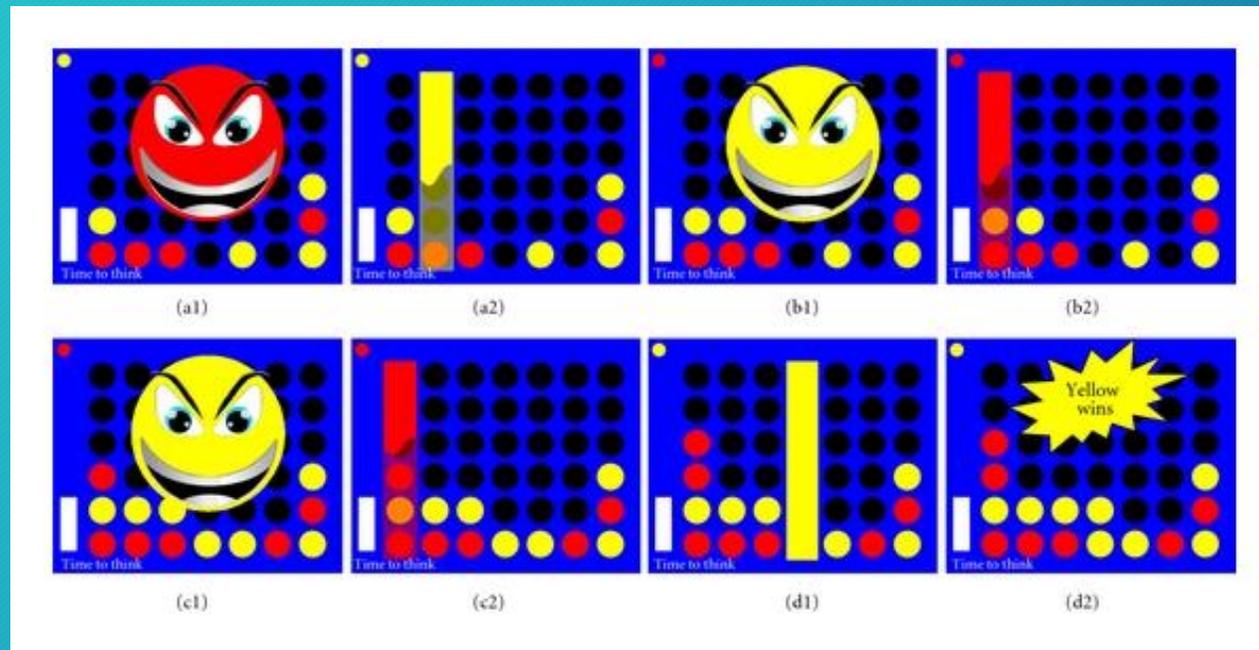


Rééducation motrice après un accident vasculaire cérébral (AVC)



Interfaces cerveaux-machines : classification selon la fonction

- Loisirs : jeux, multimédia, loisirs créatifs



Puissance 4 : cerveau contre cerveau, Centre de Recherche en Neurosciences de Lyon

Interfaces cerveau-machine : classification selon la fonction

- Loisirs : jeux, multimédia, loisirs créatifs



Mme Pfutzner, G-Tec

