



Les Interfaces Cerveau-Machine - (systèmes bouclés)

Synthèse de l'atelier national de réflexion organisé à Lyon le **6 Octobre 2009** à **Lyon**.
(organisation: Jérémie Mattout & Olivier Bertrand – U821 INSERM Dynamique Cérébrale et Cognition)

CONTEXTE	p. 2
BILAN DES INTERVENTIONS ET DISCUSSIONS	p. 3
I. Les systèmes de mesure et de stimulation de l'activité cérébrale	p. 3
II. Les méthodes de traitement du signal en temps réel	p. 6
III. Neurosciences cognitives et interfaces cerveau-machine	p. 7
IV. Neurosciences computationnelles et interfaces cerveau-machine	p. 8
V. Neurosciences cliniques et interfaces cerveau-machine	p.10
COMPLEMENTS DE LECTURE	p.12
ANNEXE 1 – PROGRAMME DE L'ATELIER	p.13
ANNEXE 2 – LISTE DES PARTICIPANTS	p.14

CONTEXTE

Les *Brain Computer Interfaces* (BCI) ou interfaces cerveau-machine (ICM) couvrent un large champ scientifique au sein duquel les recherches fondamentales, expérimentales ou cliniques et les développements technologiques de pointe sont d'égale importance et fortement imbriqués. Le domaine des ICM est en pleine expansion au niveau international et dépasse le cadre même des neurosciences. Il attire de plus en plus les efforts d'une communauté scientifique multidisciplinaire (ingénieurs, neuroscientifiques, informaticiens, mathématiciens, physiciens et cliniciens). En témoigne la mention qui a été faite des BCI dans de nombreux ateliers de réflexion PIRSTEC¹, qu'il s'agisse de questions fondamentales liées aux mécanismes cognitifs et à leurs substrats, ou de domaines d'applications des sciences cognitives comme l'éducation ou la santé. D'une certaine manière, la recherche sur les ICM et leurs applications doit suivre aujourd'hui l'exemple des recherches en sciences cognitives qui, par le passé, ont dû fédérer des disciplines très différentes et définir les frontières de leur objet d'étude et les directions de leurs travaux.

De par les fantasmes qu'elles évoquent dans tous les domaines de la société, de par leur image tantôt fascinante, tantôt effrayante, les ICM suscitent aussi l'intérêt de nombreux media, spécialisés ou non². Cet engouement croissant est surtout le reflet de l'apparition d'un nouveau champ de recherche à part entière.

Rappelons qu'une interface cerveau-machine est un système mettant en interaction directe le cerveau d'un sujet ou patient avec un agent artificiel (un ordinateur, un robot, une prothèse...). Cette interface peut être unidirectionnelle ou bidirectionnelle. Le plus souvent, la commande ou mesure physiologique est réalisée à partir d'enregistrements de l'activité cérébrale tandis que le retour (si retour il y a de la part de l'agent artificiel) peut se faire sous la forme d'une information sensorielle classique (visuelle, auditive...) ou bien par une stimulation directe du cerveau (par exemple dans le cas de la neurostimulation profonde pour interrompre ou prévenir une crise d'épilepsie). Parmi les interfaces unidirectionnelles, les rétines artificielles ou les implants cochléaires stimulent directement le cerveau pour rétablir la perception mais n'attendent aucun retour et fonctionnent en boucle ouverte. Dans le cadre de cet atelier de réflexion prospective, nous nous sommes limités au champ plus large et très vaste des interfaces bidirectionnelles, autrement dit en boucle fermée et dont le principe général est illustré par la figure ci-dessous.

Ce schéma simplifié met bien en lumière les différentes composantes d'une ICM et les spécialités scientifiques qu'il est nécessaire de réunir pour leur développement. Nous avons recensé cinq spécialités ou domaines de recherches dont la contribution est incontournable dans le domaine des ICM. Ces cinq thèmes ont jalonné nos discussions selon cinq sessions distinctes et ont permis de réunir autour d'une même table des spécialistes de ces différentes disciplines pour débattre ensemble des implications de leurs recherches ou de leurs connaissances dans le domaine des ICM.

Ces cinq thèmes sont :

- **Les systèmes de mesure et de stimulation de l'activité cérébrale ;**
- **Les méthodes de traitement du signal en temps-réel ;**
- **Les connaissances fondamentales du fonctionnement cérébral (Neurosciences Cognitives) ;**
- **Les modèles mathématiques du fonctionnement cérébral (Neurosciences Computationnelles) ;**
- **Les applications des ICM dans le domaine de la santé (Neurosciences Cliniques).**



Schéma type d'une interface cerveau-machine en boucle fermée

¹ Voir notamment les ateliers 17 (Rehaussement cognitif : neurosciences, pédagogie, remédiation) ; 19 (Interactions homme/système-artificiel) ; 22 (Sciences et technologies de la cognition par la modélisation neuronale) ; 13 (Perception spatiale, cognition motrice et adaptation sociale des organismes naturels et artificiels) ; l'atelier GDR Robotique Cognitive ; l'atelier GDR Vision ou encore l'atelier Imagerie et sciences cognitives.

² A ce propos, lire par exemple le court chapitre 'Neurosciences' du livre de Claude Allègre 'La Science est le défi du XXIème siècle' (Plon, 27/08/09).

BILAN DES INTERVENTIONS ET DISCUSSIONS

Voici une synthèse des exposés et débats qui ont porté respectivement sur les cinq grands thèmes identifiés plus haut.

I. Les systèmes de mesure et de stimulation de l'activité cérébrale

De manière générale, les systèmes de mesure de l'activité cérébrale pouvant être utilisés par une ICM sont les techniques d'exploration fonctionnelle utilisée classiquement, du moins en recherche, comme l'électrophysiologie, l'IRM ou encore l'imagerie optique. Toutefois, l'immense majorité des développements dans ce domaine exploite les diverses techniques d'électrophysiologie, pour trois raisons essentielles :

- elles offrent une excellente résolution temporelle ;
- elles peuvent être rendues portables (c'est le cas du moins de l'électroencéphalographie (EEG)) ;
- elles peuvent éventuellement être utilisées pour mesurer comme pour stimuler (cas des électrodes implantées).

Si la plupart des réflexions apportées ci-dessous n'est pas spécifique d'une modalité d'acquisition en particulier, la majorité des exemples portera naturellement sur l'utilisation de l'électrophysiologie, invasive ou non-invasive.

Cette dernière distinction est d'ailleurs un élément important aujourd'hui de catégorisation des entreprises de recherche dans le domaine des ICM. Les approches invasives désignent les systèmes de mesure qui nécessitent une implantation et donc une intervention chirurgicale. C'est le cas de l'électrocorticographie (ECoG : grille en contact direct avec la surface corticale) ou encore des électrodes profondes. Ces applications sont bien entendu réservées à un certain type de patients. La recherche sur les ICM invasives est la plus développée aux Etats-Unis alors qu'en Europe, ce sont les ICM non-invasives qui sont privilégiées. Ces dernières, dans le domaine de l'électrophysiologie, incluent l'électroencéphalographie (EEG) et la magnétoencéphalographie (MEG).

S'agissant des systèmes de stimulation, ils peuvent aussi être distingués selon les mêmes deux catégories ci-dessus. Les systèmes invasifs utilisent des électrodes ou grilles implantées, les systèmes non-invasifs comprennent aussi bien les formes de stimulation classique (visuelle, auditive, haptique...) que les stimulations électromagnétiques qui ne nécessitent pas de chirurgie et peuvent être appliquées chez des volontaires sains dans des buts de recherche, comme la Transcranial Magnetic Stimulation (TMS).

Questions abordées

- 1 - Aspects logiciels et stimulations sensorielles classiques
- 2 - Aspects instrumentaux invasifs in vitro et in vivo
- 3 - Exemples de nouveaux marqueurs électrophysiologiques non-invasifs (potentiels d'erreurs)

1 - Aspects logiciels et stimulations sensorielles classiques

Le logiciel OpenViBE né récemment (projet ANR) permet le traitement des données en temps-réel, de l'acquisition brut du signal jusqu'au retour sensoriel (ou autre) vers le sujet, en passant par toutes les étapes d'analyse, de sélection, de classification, d'interprétation et de traduction en retour. Les bases sont jetées d'un outil multi-usage (applications cliniques ou multimédia ; utilisation naïve à travers une interface ou développement pour étendre les possibilités du logiciel). Aujourd'hui, la faisabilité a été démontrée sur quelques scénarios prototypes à l'aide de techniques non-invasives (EEG). Les futurs développements reposent sur le projet ANR 2 (orienté jeux vidéo) et les contributions des futurs utilisateurs à travers le monde, puisque le logiciel est distribué librement et ouvert aux développements.

Quelques axes importants à développer dans l'avenir:

- l'ergonomie, avec encore trop peu d'études chez le patient ;
- explorer l'utilité clinique d'un lien avec la réalité virtuelle et de retours de type haptique ;
- le développement de fonctionnements adaptatifs, par apprentissage ;
- la conception de nouvelles applications en non-invasif.

2 - Aspects instrumentaux invasifs in vitro et in vivo

Il a été montré que l'on peut stimuler une plasticité cérébrale, autrement dit engendrer des modifications des réseaux neuronaux à l'aide de micro-stimulations in vitro (ex. pousse axonale ou encore inhibition de l'activité épileptique).

Dans ce domaine, quelques objectifs essentiels:

- Stimuler en boucle fermée, c'est à dire asservir la stimulation en fonction de l'activité endogène du réseau.
- Restaurer tout ou partie des fonctions locomotrices. Des études sont menées, in vitro, chez la souris dont la moelle épinière a été lésée et chez laquelle on essaye de retransmettre une commande descendante opérationnelle.

Les principaux verrous:

- Techniques: nécessité de Multi-Electrode Arrays (MEA) à court temps de réaction (< 1 ms). Premiers développements, projet Neurocom (ESIEE: électrodes, CEA-Leti: électronique intégrée).
- Fondamentaux: les modifications induites dans les cultures (in vitro) par les systèmes en boucle fermée peuvent être davantage liés à des phénomènes d'homéostasie qu'à une réelle plasticité synaptique comme celle mise en évidence par les protocoles intracellulaires (in vivo). Ces mécanismes devront être élucidés pour progresser dans ce type d'approche. Actuellement, les systèmes d'acquisition et de stimulation in vivo pour les ICM invasives, reposent tous sur des électrodes implantées avec fils. L'objectif ici serait d'aboutir à des systèmes entièrement implantables, capables de satisfaire les contraintes suivantes :
- Stabilité des électrodes implantées ;
- Electronique intégrée pour le traitement de l'information en temps-réel (une piste: les circuits programmables FPGA) ;
- Transmission radio (problèmes de consommation énergétique, de l'importance des flux de données, du traitement de signal embarqué mais aussi de sécurité et de confidentialité) ;
- Packaging avec antennes intégrées ;

Quelques systèmes de ce type commencent à voir le jour Etats-Unis. Ils restent encore limités dans la mesure où s'il s'agit de belles réalisations technologiques, ils sont encore peu utilisable ou inversement. Très peu d'informations sont disponibles concernant ces systèmes et leurs performances. A ce jour, ce ne sont que des démonstrateurs qui n'ont pas encore connus d'application clinique.

Quelques pistes pour l'avenir :

- Faire le choix de l'ECOG, pour limiter les problèmes d'instabilité des électrodes (Avec ces mesures invasives mais de surface, on perd peut-être en qualité d'information par rapport aux électrodes profondes). Au CEA (centre Clinatex de Grenoble), le premier implant est prévu pour 2011/2012.
- Une sortie RadioFréquence (sans fil) qui envoie les données brutes vers une unité de traitement (S'accompagne de questions éthiques liées à la sécurité des patients et à la confidentialité des enregistrements).

3 - Exemples de nouveaux marqueurs électrophysiologiques non-invasifs (potentiels d'erreurs)

Pour développer de nouvelles applications non-invasives, en boucle fermée, il est essentiel de trouver de nouveaux marqueurs physiologiques, exploitables en temps-réel, autrement dit de progresser dans notre interprétation des signaux électrophysiologiques et de ce qu'ils reflètent de l'intention de l'utilisateur de l'ICM.

Voici l'exemple de trois composantes EEG transitoires, détectables en temps-réel (visibles sans avoir recours à une moyenne des signaux sur un grand nombre d'essais), appelées potentiels d'erreurs et qui pourraient être à l'origine de nouvelles fonctionnalités dans certaines ICM :

- **La négativité d'erreur (Ne):** Elle apparaît environ 35ms après le début de l'activité musculaire (lors d'une réponse motrice classique) et reflèterait le degré de confiance dans la réponse (processus conscient ou non). Question: est-elle visible lors de l'imagination d'un mouvement ?

- **La positivité d'erreur (Pe):** Elle apparaît aux alentours de 300ms et est liée à la conscience d'une erreur. Question: est-elle détectable en dehors d'une activité motrice habituelle ?

- **La négativité liée au feedback (FRN):** Elle apparaît entre 200 et 300 ms après un retour explicite négatif sur une action (feedback négatif). C'est le marqueur qui serait a priori le plus prometteur pour une utilisation dans le cadre des ICM (par exemple pour corriger automatiquement une commande erronée ou mal interprétée par la machine).

Questions pour l'avenir :

Les processus neuronaux à l'origine des ces réponses restent mal connus et on ne leur connaît pas pour l'instant de signatures claires en MEG ou en EEG intracérébral.

II. Les méthodes de traitement du signal en temps-réel

L'expression générale 'traitement du signal' fait ici référence à tous types d'analyse des mesures (de nature électrophysiologique ou autre) qui, à partir du signal brut obtenu en temps-réel, aboutit à une commande ou décision que la machine exécutera (sur l'environnement ou à l'adresse de l'utilisateur lui-même). On distingue le plus souvent trois étapes sérielles :

- l'extraction de caractéristiques pertinentes dans le signal brut ;
- la classification de ces caractéristiques en termes de commande parmi l'ensemble des possibles ;
- la prise de décision qui entraîne l'exécution de la commande.

A noter que les méthodes typiquement utilisées³ sont d'abord inspirées des techniques déjà développées dans d'autres domaines et notamment en neuroimagerie classique (non temps-réel). Toutefois, a minima, elles doivent répondre aux contraintes du temps-réel :

- Etre capable d'extraire une information pertinente à partir de très peu d'observations ;
- Etre robuste face aux variabilités inter et intra-individuelle ;
- Etre suffisamment rapide.

Avec ces contraintes à l'esprit, la communauté du traitement de signal, composée de spécialistes en mathématiques appliqués et modélisation, est alors confrontée à deux questions essentielles :

- Quelles sont les composantes ou caractéristiques pertinentes dans le signal complexe qui est mesuré ?
- Quels types de traitements peut-on appliquer pour en déduire la commande à transmettre à la machine ?

Ces questions n'ont souvent pas de réponses uniques mais plusieurs réponses directement liées à l'application visée. Ainsi, une question incontournable pour les chercheurs et ingénieurs qui souhaitent développer de telles méthodes est celle de l'objectif en termes d'application, clinique ou autre, mais aussi de performances attendues. Cela souligne l'importance de développer des méthodes de traitement du signal pour les ICM, en étant guidé, d'une part par les connaissances en Neurosciences⁴ et, d'autre part, par les besoins concrets du monde clinique ou de la société en général⁵. Ceci nécessite une étroite collaboration entre disciplines et notamment entre spécialistes de Neurosciences cliniques et cognitives et spécialistes en traitement du signal.

Force est de constater qu'il n'y a pas de structure française actuellement qui regroupe ces différentes compétences dans un but commun et multidisciplinaire, contrairement aux quelques centres mondiaux (parfois de taille modeste) qui sont aujourd'hui les leaders dans le domaine des ICM⁶.

Dés lors, il est plus difficile de répondre aux vastes questions concernant l'orientation à donner aux recherches en traitement du signal pour les ICM, notamment :

- Doit-on privilégier les interfaces invasives ou non-invasives ?
- Quelle technique choisir parmi les différentes modalités (EEG, MEG, IRM, ECoG, imagerie optique...) ?
- Comment définir de nouveaux marqueurs physiologiques ?
- Quelles applications pour quels besoins cliniques ?
- Comment évaluer les nouvelles méthodes ?

³ Ces méthodes sont le plus souvent dérivées des techniques d'analyses statistiques multi-dimensionnelles, d'analyses fréquentielles ou temporelles notamment utilisées dans les télécommunications ou encore des approches de type probabiliste ou d'apprentissage automatique.

⁴ Essentielles pour déterminer les caractéristiques pertinentes du signal (marqueurs physiologiques).

⁵ Essentiels pour adapter les traitements aux objectifs de l'ICM.

⁶ Citons à titre d'exemple l'*Institute of Medical Psychology & Behavioral Neurobiology* (Tübingen, Allemagne, N. Birbaumer) ; *Wadsworth Center* (Albany, USA, J. Wolpaw) ; *Center for Neuroprosthetics* (Lausanne, Suisse, J. del R. Milan) ; *Duke University Medical Center* (Durham, USA, N. Nicolelis).

III. Neurosciences Cognitives et Interfaces cerveau-machine

Les progrès dans le domaine des ICM sont tributaires de notre connaissance des mécanismes neurobiologiques qui sous-tendent notre activité mentale. Meilleure sera notre compréhension des liens entre activité cérébrale et processus cognitifs, plus nous serons à même de proposer des ICM évoluées et performantes, grâce à une interprétation fine, rapide et robuste des intentions de l'utilisateur. Cela signifie que les recherches dans le domaine des ICM doivent rester intimement liées aux recherches en Neurosciences Cognitives. En effet, c'est notre connaissance des spécificités spatiales, temporelles et fréquentielles de l'activité neuronale liée aux fonctions perceptives, motrices, attentionnelles ou encore de raisonnement qui nous permettront, à la fois d'informer la machine des caractéristiques pertinentes à exploiter dans l'activité cérébrale, mais aussi de guider l'utilisateur vers des processus cognitifs qui favoriseront l'interaction⁷.

Là encore, les techniques d'électrophysiologie, invasives ou non, qui fournissent une mesure directe et instantanée de la dynamique neuronale, sont privilégiées. De plus, deux types de processus cognitifs, de par leur caractère générique, sont particulièrement étudiés pour de potentielles applications en ICM :

- Les processus moteurs

Le décodage en temps réel de l'intention motrice est essentiel, notamment dans la perspective de permettre la commande d'un membre artificiel directement à partir de l'activité cérébrale (neuroprothèse). Les recherches dans ce domaine ont beaucoup progressé grâce aux enregistrements invasifs chez le singe. A travers des mesures intra-cellulaire, multi-cellulaire ou d'EEG intra-cérébral (potentiels de champs locaux), il a pu être montré qu'il est possible d'extraire, en temps réel, l'information de direction de mouvement mais aussi, dans certaines conditions, de vitesse et de position. Des résultats relativement similaires, dans certains cas simples, ont été obtenus chez l'homme à l'aide de techniques non-invasives (EEG/MEG).

Il ressort aussi de ces études que l'information 'macroscopique' d'activités au sein d'un réseau local ou longue distance (synchronies) reflète une partie ou est complémentaire de l'information 'microscopique' des activités au niveau de quelques neurones (taux de décharge).

Toutefois, dans le cas d'une neuroprothèse, la boucle sera véritablement fermée dès lors qu'un retour sensoriel complet (visuel mais aussi somesthésique⁸) pourra être délivré au cerveau. De récents travaux du groupe de M. Nicolelis suggèrent que c'est possible, grâce à une micro-stimulation intra-corticale des cortex sensoriels primaires.

- Les processus attentionnels

Les meilleurs marqueurs actuels de l'attention, potentiellement exploitables en temps réel, sont les rythmes électrophysiologiques observables en invasifs et parfois en non-invasifs. Notamment chez des patients épileptiques implantés en vue d'un bilan fonctionnel pré-chirurgical, il a pu être observé que l'activité alpha (8-13Hz) dans le cortex pariétal postérieur est modulée par l'attention. Chez ces mêmes patients, il semble également que les variations d'activités oscillatoires dans la bande gamma (50-150Hz) indiquent des déplacements de l'attention. La question reste ouverte de savoir si ces mêmes marqueurs pourraient être exploités à partir de mesures non-invasives, en temps réel ?

Questions pour l'avenir :

Les recherches en Neurosciences Cognitives ont montré, de manière générale, que le cerveau est extrêmement plastique au sens où les réseaux neuronaux s'adaptent voire apprennent à exécuter une tâche, que celle-ci soit motrice ou plus cognitive. Dans le domaine moteur, il a même été montré qu'un seul neurone peut être entraîné pour effectuer une tâche entièrement nouvelle. Dès lors se pose la question de savoir si une ICM doit à tout prix exploiter les réseaux neuronaux déjà formés pour commander une machine, ou s'il est préférable et plus simple d'exploiter les capacités plastiques du cerveau et laisser le sujet apprendre à fournir le signal dont la machine a besoin pour fonctionner ? Autrement dit, quelle est la meilleure stratégie pour optimiser une ICM ? Jusqu'où est-il nécessaire d'aller dans la finesse du décodage du langage neuronal ?

⁷ Cela implique que les recherches sur les ICM, qui évoquent aisément des travaux très appliqués, ne peuvent être sérieusement envisagées sans leur source première d'innovation que sont les découvertes en Neurosciences Cognitives et notamment la compréhension du code neural à travers des recherches fondamentales chez l'homme mais aussi chez l'animal (le primate et le rongeur) afin de faire le lien entre les différentes échelles de mesure (invasif/non-invasif, cellulaire/population neuronale, activité synaptique/influx nerveux/potentiels de champs locaux...).

⁸ Sens du toucher, procurant les informations de pression, chaleur, texture...

Jusqu'à quel point le cerveau du sujet peut-il s'adapter à la machine et dans quelles conditions ? Cette question rejoint celle plus fondamentale du fonctionnement cérébrale et des mécanismes de plasticité. Elle rejoint également la question de l'intérêt pour des ICM adaptatives où la machine à son tour serait capable d'évoluer pour optimiser l'interaction.

Enfin soulignons que l'interaction du domaine des ICM avec les Neurosciences Cognitives plus fondamentales peut s'envisager à double sens, car la capacité à analyser les données d'imagerie en temps-réel que promeuvent les ICM ouvre la perspective de nouveaux paradigmes expérimentaux chez le volontaire sain, notamment en permettant d'adapter les paramètres d'acquisition ou de simulation en fonction de l'activité cérébrale et donc de l'état mental du sujet.

IV. Neurosciences Computationnelles et Interfaces cerveau-machine

Ce qui est apparu récemment et qu'a aussi fait ressortir cette journée de réflexion, c'est que les Neurosciences Computationnelles, parfois considérées comme une branche des Neurosciences Cognitives, auront sans doute un rôle particulier et primordial à jouer dans le développement des futurs ICM. Les Neurosciences Computationnelles ont pour objectif l'étude et la modélisation formelle (à l'aide d'algorithmes) des fonctions cérébrales au sens de processus de traitement de l'information (processus mentaux) et de leurs implémentations biologiques (processus physiologiques). Ces modèles pourraient intervenir à plusieurs niveaux. Nous en voyons au moins deux :

- Une branche des Neurosciences Computationnelles s'intéresse à des modèles, à la fois physiologiques et mécanistiques, susceptibles de décrire puis de reproduire les processus d'émergence d'une fonction (un comportement) dans un espace de dimension relativement faible (typiquement l'espace de nos actions), à partir de dynamiques complexes dans un espace de haute dimension (l'espace multidimensionnel occupé par l'activité cérébrale et ses différentes caractéristiques spatiales, fréquentielles, temporelles...). Ces modèles mathématiques de plus en plus complexes essayent de faire le lien entre réseaux neuronaux et théorie des systèmes dynamiques afin d'expliquer simultanément la structure temporelle des dynamiques neuronales et comportementales. Quelques réalisations très récentes dans ce domaine ont montré que des modèles biologiquement plausibles conduisent à l'émergence de dynamiques cohérentes et déjà observées in vivo, comme la réduction du taux de décharge neuronal et l'augmentation des synchronies au fur et à mesure d'un apprentissage.

Ces modèles dont l'objectif fondamental est d'expliquer à la fois notre activité mentale et notre activité cérébrale, participeront sûrement de cet effort pour décoder les signaux cérébraux mesurables en temps réel. Leur développement nécessite d'attirer des chercheurs mathématiciens vers les problématiques des Neurosciences en général et des ICM en particulier.

- Une autre branche des Neurosciences Computationnelles s'attache davantage à modéliser un comportement optimal, dans une situation d'interaction bidirectionnelle avec l'environnement, sans nécessairement s'attacher à la manière dont ce comportement est effectivement codé et implémenté dans le cerveau. Typiquement, la théorie de l'apprentissage par renforcement relève de cette démarche. Issu des Neurosciences (ex. modèle de Rescola et Wagner) puis doté d'un cadre formel provenant de la théorie du contrôle (équation de Bellman), l'apprentissage par renforcement a développé des algorithmes adaptatifs (ex. TD- et Q-learning) capables d'apprendre à partir d'un signal d'erreur (ou de récompense) en réponse à leurs propres actions sur l'environnement. Ces algorithmes reposent sur un compromis entre 'exploration' de l'environnement dans le but d'apprendre le comportement optimal (celui qui minimise l'erreur ou conduit au maximum de récompense) et 'exploitation' du comportement optimal appris. La grande force de ces algorithmes est qu'ils n'ont pas besoin de connaître les mécanismes cachés de l'environnement pour apprendre et adopter un comportement optimal.

Cela signifie que ces approches pourraient être très utiles dans l'avenir, que ce soit pour modéliser le comportement humain (notamment dans le cadre d'une interaction avec une ICM) ou pour concevoir des machines 'intelligentes' capables de s'adapter pour optimiser leur interaction avec l'utilisateur au cours du temps. Rejoignant ainsi les problématiques de cognition sociale, les ICM qui réalisent l'interaction entre un agent humain et un agent artificiel, pourrait grandement bénéficier des ce type d'approches. Il est même possible d'envisager une modélisation même de la dynamique de l'interaction elle-même entre les deux agents, afin notamment de son évolution, son équilibre ou les paramètres qui détermineraient un mode optimal et stable (en lien avec la notion d'équilibre de Nash en théorie des jeux).

Là encore, la recherche sur les ICM montre le besoin de s'adjoindre les compétences d'informaticiens et mathématiciens.

V. Neurosciences Cliniques et Interfaces cerveau-machine

Si les ICM peuvent avoir des applications grand-public (comme dans le domaine du jeu vidéo), ce sont surtout leurs potentielles applications cliniques qui demeurent le moteur principal des recherches dans ce domaine. Et si ces potentielles applications sont multiples et touchent de nombreuses pathologies neurologiques aux caractéristiques très différentes, il n'existe toujours pas aujourd'hui d'exemple où une ICM s'est imposée comme la meilleure solution thérapeutique ou le meilleur palliatif du handicap. C'est pourquoi, peut-être plus encore que dans d'autre recherche à visée clinique, les recherches sur les ICM doivent être à l'écoute du besoin des patients et des services cliniques. Au cours de cet atelier, nous avons abordé deux exemples de pathologies neurologiques qui illustrent bien l'étendu des espoirs que suscitent les ICM et l'ampleur du chemin qu'il reste à parcourir

- ICM et épilepsie

Un tiers des patients épileptiques ne répondent pas aux traitements médicamenteux. Pour eux, outre la solution chirurgicale qui n'est pas toujours envisageable, un espoir réside dans la neurostimulation. Aujourd'hui, seule la stimulation du nerf vague a pu être validée. Elle est toutefois très peu spécifique et on en connaît mal les mécanismes. Une perspective sérieuse est celle de la stimulation cérébrale profonde qui peut prendre l'une des deux formes suivantes :

- En boucle ouverte : une stimulation périodique vise à diminuer l'excitabilité générale du réseau afin de réduire le nombre de crises ;
- En boucle fermée : la stimulation n'intervient que lorsqu'un début de crise est détecté pour l'enrayer. La stimulation est délivrée au niveau du foyer épileptique présumé ou à distance.

Il y a encore très peu de résultats sur ces dernières approches. Une étude américaine sur 240 patients n'a pas pour l'instant mis en évidence d'effet bénéfique clair d'un système bouclé par rapport au traitement placebo. Il semble que d'importantes recherches chez l'animal soient encore nécessaires avant de pouvoir procéder à des tests in vivo chez l'homme.

D'importantes questions restent sans réponses :

- Comment détecter les crises ?
- Quel type stimulation ?
- Quand et où stimuler ?
- Quels patients doit-on implanter ?
- Système ouvert ou fermé ?

- ICM et rééducation fonctionnelle

Les cliniciens, spécialistes de médecine physique et de réadaptation ont pour rôle la mise en œuvre de programmes de rééducation de patients, victimes d'accidents ou de pathologies graves à l'origine d'handicaps sévères. En impliquant souvent de nombreuses spécialités médicales (médecine générale, neurologie, traumatologie, orthopédie, kinésithérapie, ergothérapie, neuropsychologie...) ces programmes visent à réduire au maximum les handicaps physiques mais aussi cognitifs, psychologiques et sociaux dont souffrent les malades.

Dés lors, et étant donné l'imperfection des solutions actuelles, on comprend l'espoir que peuvent susciter ici les recherches sur les ICM. Il existe deux grands types d'applications potentielles:

- Les ICM pour l'aide à la communication et à l'autonomie comme avec le système du *P300-speller* pour l'aide à la communication des patients *Locked-In* ; ou pour établir une communication avec certains patients dans un état de conscience minimal ; ou encore pour la commande d'un exosquelette (ex. *Walk Again Project* initié par M. Nicolelis).

- Les ICM à visée thérapeutique dont l'objectif serait de favoriser certains mécanismes de plasticité cérébrale grâce à un entraînement par *neurofeedback*.

Pour que ce type d'ICM voie le jour, il est nécessaire de progresser dans tous les domaines de recherche évoqués précédemment. Aujourd'hui il n'existe pas d'ICM invasive ou non-invasive qui surpasse les dispositifs existants⁹ et qui justifierait une large diffusion.

⁹ Les dispositifs actuels d'aide à la communication et à l'autonomie exploitent le plus souvent l'activité musculaire résiduelle.

COMPLEMENTS DE LECTURE

- **Principles of neural ensemble physiology underlying the operation of brain-machine interfaces**, M. Nicolelis & M. Lebedev, Nature Rev. Neuroscience **2009**.
- **Grand Challenges of brain computer interface in the years to come**, E. Vaadia & N. Birbaumer, Frontiers in Neuroscience **2009**.
- WTEC Report, **International Assessment of Research and Development in BCI, 2007** (<http://www.wtec.org/bci/BCI-finalreport-10Oct2007-lowres.pdf>).

ANNEXE 1 - PROGRAMME DE L'ATELIER

L'atelier d'une journée organisé sous l'égide du programme PIRSTEC a permis de réunir pour la première fois la plupart des acteurs et futurs acteurs français dans le domaine des ICM. L'objectif ambitieux de cette première rencontre nationale était de définir les composantes essentielles de ce grand thème de recherche et d'identifier les besoins actuels, en France, pour permettre une recherche de pointe, capable de rassembler des équipes pluridisciplinaires pour concurrencer les projets existants en Amérique du nord, au Japon et déjà en Europe.

Au cours de cette unique journée, nous avons tout de même réussi à regrouper un panel d'experts, chercheurs, médecins et ingénieurs représentants toutes les disciplines impliquées, afin d'aborder les questions suivantes :

- **Quels types d'ICM sont envisageables et souhaitables ?**
- **Quels sont aujourd'hui les verrous technologiques et scientifiques relatifs aux ICM ?**
- **Est-ce qu'une recherche forte dans le domaine des ICM appellerait une organisation particulière des moyens de recherches ?**

Précisément, les ICM sont nées de progrès technologiques et de la quête de nouvelles solutions thérapeutiques. Aujourd'hui, pour dépasser les limites des systèmes actuels, il faut renforcer le lien entre objectifs cliniques et recherches fondamentales en neurosciences. Ainsi notre réflexion s'est articulée autour des disciplines et aspects suivants :

- **Les techniques de mesures et de stimulation de l'activité cérébrale en temps-réel** (neuroimagerie, électrophysiologie EEG, MEG, EEG intracérébrale, imagerie optique, neurostimulation, stimulation magnétique transcranienne... mais aussi le retour sensoriel);
- **Des approches expérimentales, à la fois chez l'homme (patients et sujets sains) et chez l'animal;**
- **Des applications et objectifs à la fois cliniques** (outils de rééducation : parkinson, douleur, épilepsie, autisme, acouphènes, déficits attentionnels...), **sociétaux** (outils de communication) **et fondamentaux** (étude des mécanismes de plasticité cérébrale, neurofeedback, nouveaux paradigmes expérimentaux en Neurosciences Cognitives).
- **Des recherches amont en traitement du signal, neuroimagerie, modélisation et neurosciences cognitives.**

Afin d'apporter un début de réponses aux questions évoquées ci-dessus, nous avons regroupé des intervenants issus de ces différents champs de recherche plus un certains nombres de participants qui ont également contribué aux débats (cf. liste des participants en annexe). Cette journée s'est articulée autour de cinq grands thèmes correspondant aux principales disciplines qui nourrissent ou seront appelées à nourrir la recherche sur les ICM. Le programme était le suivant:

9:30 *Accueil - Introduction (Jérémy Mattout & Olivier Bertrand)*

9:45 **Session 1 - Traitement du signal** (modérateurs: **Maureen Clerc** et **Antoine Souloumiac**)

- **Marco Congedo** (Grenoble) 10'
Thoughts on Current and Future Research on BCI in France
- **François Cabestaing** (Lille) 10'
Vers une recherche mono-disciplinaire ?

10:30 **Session 2 - Systèmes d'acquisition et de stimulation** (modérateur: **Olivier David**)

- **Anatole Lecuyer** (Rennes) 10'
Problèmes logiciels, ergonomie et usage des BCI
- **Blaise Yvert** (Bordeaux) et **Régis Guillemaud** (Grenoble) 20'
Dispositifs multi-électrodes in vitro et in vivo pour des études du Système Nerveux Central et des applications BCI
- **Boris Burle** (Marseille) 10'
Est-ce moi ou le classifieur qui s'est trompé? Les potentiels d'erreurs: une aide pour le BCI?

11:30 **Session 3 - Neurosciences cognitives** (modérateur: **Karim Jerbi**)

- **Alexa Riehle** (Marseille) 15'
Décodage des intentions motrices pour le contrôle du mouvement d'un effecteur artificiel
- **Jean-Philippe Lachaux** (Lyon) 15'
Du contrôle d'un ordinateur au contrôle de soi : l'entraînement de l'attention grâce aux interfaces cerveau-machine

12:30 *Pause déjeuner*

13:30 **Session 4 - [Neurosciences computationnelles](#)** (modérateur: **Jérémie Mattout**)

- **Rémi Munos** (Lille) 15'
Exploration/exploitation en apprentissage par renforcement
- **Viktor Jirsa** (Marseille) 15'
Dynamic mechanisms underlying the emergence of function from neural network interactions

14:30 **Session 5 - [Neurosciences cliniques](#)** (modérateur: **Karen Reilly**)

- **Philippe Kahane** (Grenoble) 15'
Neurofeedback invasif et non-invasif pour l'épilepsie
- **Jacques Luauté** (Lyon) 15'
Rééducation fonctionnelle et interfaces cerveau-machine

15:30 *Pause*

16:00 - 18:00 **Discussions – débats**

ANNEXE 2 - LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Affiliation	Ville
AGUERA Pierre-Emmanuel	INSERM U821	Lyon
AKSENOVA Tatiana	CEA-LETI, Clinatec	Grenoble
BERTRAND Olivier	INSERM U821	Lyon
BURLE Boris	LNC, CNRS	Marseille
CABESTAING François	LAGIS	Lille
CLERC Maureen	INRIA	Sophia-Antipolis
CONGEDO Marco	GIPSA-Lab	Grenoble
DAVID Olivier	GIN, U836	Grenoble
FREGNAC Yves	UNIC, CNRS UPR 2191	Gif-sur-Yvette
GUILLEMAUD Régis	CEA-LETI, Clinatec	Grenoble
JERBI Karim	INSERM U821	Lyon
JIRSA Viktor	CNRS	Marseille
JUTTEN Christian	GIPSA-Lab	Grenoble
KAHANE Philippe	GIN	Grenoble
LACHAUX Jean-Philippe	INSERM U821	Lyon
LECUYER Anatole	INRIA	Rennes
LORENCEAU Jean	RISC, PIRSTEC	Paris
LUAUTE Jacques	INSERM U864, HCL	Lyon
MABY Emmanuel	INSERM U821	Lyon
MARTINERIE Jacques	CNRS, CRICM	Paris
MATTOUT Jérémie	INSERM U821	Lyon
MESTAIS Corinne	CEA-LETI, Clinatec	Grenoble
MUNOS Rémi	INRIA Sequel	Lille
REILLY Karen	CNRS UMR 5229	Lyon
RIEHLE Alexa	INCM, CNRS	Marseille
SOULOUMIAC Antoine	CEA List	Saclay
YVERT Blaise	CNIC UMR 5228	Bordeaux