

LABORATOIRE DE L'IRSEM 2012



Laboratoire de l'IRSEM n°8 - 2012

Réflexions sociétales sur l'interface cerveau-machine

Une interface cerveau machine ou ICM est une liaison directe entre un cerveau et un dispositif externe (un ordinateur, un robot, un drone, une prothèse), permettant à un individu de communiquer avec son environnement grâce aux signaux qui proviennent de l'activité électrique des neurones. Dans le domaine militaire, les travaux de recherche les plus nombreux et les plus avancés (les premières applications sont estimées à 2020) sont menés par l'armée américaine et concernent l'amélioration des performances des militaires au combat ou encore la commande de drones. Elles pourraient être aussi utilisées au sein d'avions de combat à réaction afin de permettre une surveillance en temps réel des états cérébraux du pilote, dans le but d'alerter avant la survenue d'une perte de conscience (qui peut-être dramatique) et déclencher le mode de pilotage automatique. En France, la Défense s'intéresse principalement à la problématique des ICM au travers du suivi attentif de la recherche scientifique. La présente recherche issue d'un atelier coordonné par Agnès Colin identifie les enjeux juridiques, éthiques et sociaux liés au développement de ces technologies.



ISBN : en cours

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'Homme et implications pour la Défense

Agnès Colin

avec Xavier Bigard, Laurent Bonnet, Stéphane Buffat,

Serge Couvet, Régis Guillemaud, Olivier Legendre, Virginie Tournay, Pierre-Paul Vidal.

AVERTISSEMENT

Les opinions émises dans ce document
n'engagent que leurs auteurs.

Elles ne constituent en aucune manière
une position officielle du ministère de la défense.

Remerciements

Les membres du groupe de travail et la direction de l'IRSEM remercient les personnalités qui sont intervenues pour exposer et faire partager leur expertise : Louis Benabid (Clnatec), Anne-Marie Benoit (UMR Pacte Grenoble), Patrick Clervoy (SSA).

Composition du groupe de travail :

Pierre-Paul Vidal, Université Paris Descartes, président de ce groupe de travail

Agnès Colin, IRSEM, pilote scientifique et rapporteur des travaux

Xavier Bigard, Service de santé des armées

Stéphane Buffat, Service de santé des armées

Laurent Bonnet, Institut national en recherche informatique et en automatique

Serge Couvet, société THALES

Régis Guillemaud, CEA

Olivier Legendre, Institut Droit et Santé

Virginie Tournay, Institut d'études politiques, Pacte Grenoble

Table des matières

- INTRODUCTION..... 8
- 1-Le contexte 10
- 2- Un état de l'art des recherches..... 12
 - Un panorama des recherches menées actuellement13
 - Quelques défis scientifiques pour les années à venir.....17
- 3-Applications pour la Défense..... 19
- 4- Limites des ICM en lien avec les limites du cerveau 23
- 5- Pharmacopée et dysfonctionnement des ICM 25
- 6- La protection des données personnelles..... 27
- 7- Questionnements éthiques et juridiques..... 31
- 8- Réflexions sur les possibles et l'imaginaire avec les nouvelles technologies 36
- CONCLUSION 41
- Bibliographie..... 43

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme
et implications pour la Défense

Résumé

Une interface cerveau machine ou ICM est une liaison directe entre un cerveau et un dispositif externe (un ordinateur, un robot, un drone, une prothèse), permettant à un individu de communiquer avec son environnement grâce aux signaux qui proviennent de l'activité électrique des neurones. Les premiers travaux de recherche sur ces technologies ont débuté en France dès les années 70 (concept proposé par J.J Vidal, 1973). Ils étaient originellement circonscrits au domaine médical et plus précisément à la palliation du handicap. Encore aujourd'hui, la majorité des applications des ICM sont destinées à rétablir des fonctions endommagées chez l'homme, telles que, l'ouïe, la vue, le mouvement (paralysie).

Toutefois, depuis une dizaine d'années, les recherches sur les ICM se sont considérablement accélérées et leurs objectifs diversifiés en raison de l'essor des neurosciences, d'une meilleure connaissance du cerveau, de la robotique et de l'informatique. Si bien qu'elles ne se limitent plus désormais au domaine médical. Des applications militaires et civiles des ICM font l'objet de nombreuses recherches. Les retombées « grand public » concernent notamment le secteur vidéo ludique.

Objets de fantasmes avec la communication directe par la pensée entre individus ou encore la commande à distance de la machine par l'homme, les ICM imprègnent de nombreux mythes et imaginaires. Les publications de science fiction abondent et sont régulièrement relayées par les médias. Cependant, au regard du panorama technologique actuel, force est de constater que les ICM demeurent à l'état embryonnaire et que bon nombre de défis scientifiques doivent encore être relevés avant d'intégrer notre quotidien.

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme et implications pour la Défense

Cette réflexion sociétale, éthique et juridique, des applications des ICM s'inscrit dans la continuité et la poursuite des travaux menés à l'IRSEM sur "l'Homme augmenté", avec les nouvelles technologies¹.

Dans le domaine militaire, les travaux de recherche les plus nombreux et les plus avancés (les premières applications sont estimées à 2020) sont menés par l'armée américaine et concernent l'amélioration des performances des militaires au combat ou encore la commande de drones. Elles pourraient être aussi utilisées au sein d'avions de combat à réaction afin de permettre une surveillance en temps réel des états cérébraux du pilote, dans le but d'alerter avant la survenue d'une perte de conscience (qui peut-être dramatique) et déclencher le mode de pilotage automatique. En France, la Défense s'intéresse principalement à la problématique des ICM au travers du suivi attentif de la recherche scientifique, le développement technologique des ICM étant considéré à ce jour comme non mûre.

En effet, un certain nombre de verrous technologiques font obstacles à une percée des recherches dans le domaine des ICM et concernent tant les dispositifs invasifs que non-invasifs. Ainsi, les techniques non invasives actuellement développées (utilisation d'un casque posé sur le crâne afin d'enregistrer l'activité électrique du cerveau de l'utilisateur) se heurtent à la faible qualité du signal enregistré. Les techniques invasives quant elles, recueillent un signal de meilleure qualité, mais sont peu développées hors laboratoire pour plusieurs raisons. D'une part, elles présupposent la mise en œuvre d'actes lourds de neurochirurgie. D'autre part elles soulèvent de nombreuses questions éthiques et présentent des risques notables pour l'utilisateur en raison de la faible biocompatibilité des matériaux présents dans les implants. Elles renvoient à l'utilisation d'implants cérébraux pour augmenter les capacités humaines et au contrôle des fonctions cognitives des individus. Bien que ces perspectives soient lointaines, il est impératif

¹ Voir le rapport final du groupe de travail IRSEM sur l'augmentation des performances humaines avec les nouvelles technologies, mai 2010, http://www.irsem.defense.gouv.fr/IMG/pdf/Travaux_de_l_Irsem_no2.pdf, consulté le 17 novembre 2011.

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme et implications pour la Défense

de débattre de ces questions avant d'envisager un développement des ICM. En effet, dès lors que l'on agit sur le cerveau, il existe un risque d'action sur le comportement humain.

Les ICM suscitent également des interrogations juridiques. Ainsi, peut-on considérer comme licite l'implantation d'une ICM sur un individu en l'absence de nécessité médicale ? Quelle doit être la nature de l'information² délivrée à la personne dans une telle hypothèse et quelles doivent être les conditions de recueil de son consentement ? Les données issues de la mesure des états cérébraux doivent-elles faire l'objet d'une protection spécifique en raison des détournements dont elles peuvent faire l'objet ? Telles sont les questions que doivent se poser les juristes lorsqu'ils abordent la problématique des ICM.

Or, si la doctrine juridique porte un intérêt grandissant à l'étude des neurosciences, force est de constater que la problématique de l'ICM est pour l'heure peu traitée.

Ces interrogations concernent directement le secteur de la défense au sein duquel les ICM sont potentiellement appelées à connaître un net essor au cours des prochaines années.

² <http://www.strategie.gouv.fr/content/note-de-veille-n%C2%B0128-mars-2009-analyse-impacts-des-neurosciences-quels-enjeux-ethiques-pour->, note du Conseil d'analyse stratégique, publié en mars 2009, consulté le 12 septembre 2009.

■ INTRODUCTION

Les techniques d'imagerie médicales non invasives et les progrès réalisés dans la compréhension du fonctionnement cérébral offrent de nouvelles possibilités d'observation et d'intervention sur le cerveau humain. Depuis une vingtaine d'années, ces progrès ont abouti au développement de dispositifs expérimentaux ayant reçu un fort retentissement médiatique : les interfaces cerveau machine ou ICM³.

Une ICM désigne un système de liaison directe entre un cerveau et un dispositif (un ordinateur, un robot, un drone, une prothèse), permettant à un individu de communiquer avec son environnement grâce aux signaux issus de l'activité électrique des neurones. Il devient possible de mesurer l'activité cérébrale par le biais de capteurs, de traiter ces données par ordinateur pour en extraire l'information pertinente, et d'envoyer une commande à un dispositif, sans mouvement ou parole. Le contrôle d'une prothèse par une activité cérébrale volontaire est une application des plus représentatives de ces interfaces. Cela laisse entrevoir de nouveaux moyens de communication et d'interaction pour des personnes atteintes de paralysie totale. Au-delà du strict terrain médical, des recherches civiles et militaires se développent autour de l'exploration des mécanismes cérébraux qui sous-tendent la mémoire, les pensées, les émotions et les comportements. La Défense américaine travaille ainsi au contrôle de systèmes d'armes (robots ou drones) par l'activité cérébrale ; ce qui fait dire à certains comités de prospectives que de possibles applications pourraient prendre forme dès 2020⁴. Ces travaux ont pour perspective

³ On parle de BCI en anglais pour Brain computer interface

⁴ <http://www.wired.com/wiredscience/2008/08/uncle-sam-wants/>, article du 13 août 2008, consulté le 16 août 2011.

<http://www.slate.fr/story/22881/guerre-technologique-insectes-cyborgs-attaquent>, article du 11 juin 2010, consulté le 16 août 2011.

globale une augmentation des performances des opérateurs⁵, et donc du combattant.

Ce champ de recherche, en pleine expansion, ouvre la voie à des usages diversifiés. Certains sont bien développés, notamment dans le domaine médical. D'autres demeurent encore au stade expérimental.

L'objectif de cette étude est de dresser un panorama prospectif autour des travaux menés sur les ICM, d'en examiner les potentialités pour la Défense, et de rendre compte des aspects éthiques, juridiques, philosophiques, associés aux recherches. Ce sujet s'inscrit dans la continuité et la poursuite des travaux de réflexion menés à l'IRSEM sur "l'Homme augmenté", avec les nouvelles technologies.

La première étape consiste à clarifier les avancées techniques de ce domaine pluridisciplinaire où convergent les neurosciences, l'informatique, la robotique, l'ergonomie, la psychologie cognitive, les sciences humaines et sociales et la philosophie des sciences. Cet inventaire s'avère nécessaire pour expliciter les opportunités offertes par ces nouvelles ICM, cerner les enjeux de leur utilisation pour la défense, départager la réalité et les projections fictionnelles, et finalement contribuer à l'apport d'éléments pour le futur. L'établissement de cette prospective dans sa dimension duale civile-militaire implique également de faire état des questionnements éthiques et juridiques, afin de déterminer notamment dans quel cadre réglementaire ces nouvelles technologies seront amenées à se développer.

⁵ Une interaction directe entre processus de pensée (via des implants appropriés basés sur les nouvelles technologies) et commande de systèmes d'armes pourrait, par exemple, diminuer le temps de réaction de l'opérateur.

■ 1-LE CONTEXTE

Une ICM est un moyen de communication basé sur l'activité cérébrale d'un sujet. Le but est de permettre à tout individu d'envoyer un message à un ordinateur, un robot par exemple, à partir des signaux électriques émis par son cerveau. Il existe de nombreuses manières de mesurer l'activité électrique cérébrale. Chacune des méthodes existantes présente des avantages et inconvénients en termes de coût, d'encombrement, de mobilité, de résolution temporelle et spatiale. Les ICM sont le plus souvent utilisées pour assister, augmenter, réparer une fonction cognitive ou sensori-motrice. Il s'agit d'une thématique de recherche appliquée, principalement biomédicale, qui a émergé dans les années 1970⁶. Mais ce n'est que depuis une dizaine d'années, que les recherches se sont multipliées.

La structure d'une ICM comprend un système d'acquisition et de traitement des signaux cérébraux, un système de classification et traduction de ces signaux dans un ordinateur, un système de commande mécanique d'un élément de l'environnement (un clavier d'écran, un fauteuil roulant, une prothèse, etc.), et une boucle finale de rétroaction⁷. Les signaux proviennent de l'activité électrique des neurones. Avec l'apport des sciences cognitives, des moyens de mesure de l'activité cérébrale in vivo ont été développés. Du fait des caractéristiques anatomiques et fonctionnelles du cerveau, ces techniques d'imagerie permettent une précision temporelle et spatiale de localisation. L'acquisition de l'information peut être invasive : une électrode unique ou

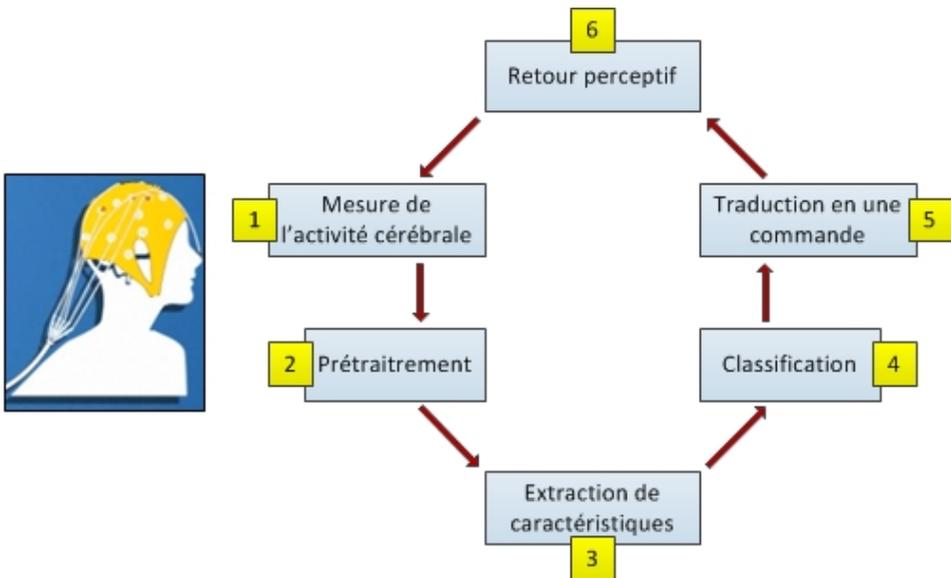
⁶ Voir le site de l'INSERM

<http://www.inserm.fr/thematiques/technologies-pour-la-sante/dossiers-d-information/interface-cerveau-machine>.

⁷ Envoyer une commande ne suffit pas, il faut un retour de la machine afin d'ajuster l'action en temps réel.

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme et implications pour la Défense

une grille d'électrodes ou bien une matrice d'électrodes peuvent être implantées en surface du cortex avec une excellente résolution spatiale. Elle peut également être non invasive ; l'information est alors recueillie par un électroencéphalogramme placé sur le cuir chevelu des sujets. Ces méthodes non invasives ont une faible résolution spatiale si bien que les signaux de l'activité cérébrale deviennent difficiles à traiter et nécessitent de multiples ajustements.



Description du fonctionnement d'une ICM

Plusieurs laboratoires en France (paragraphe suivant) travaillent aujourd'hui à améliorer et miniaturiser les capteurs, à optimiser la transmission et le débit d'informations, à croiser ces dispositifs avec les préoccupations ergonomiques et l'accessibilité du patient. En particulier, les recherches académiques se développent autour de l'aide aux personnes à mobilité réduite, voire lourdement handicapées afin de leur offrir un nouveau canal de communication avec le monde extérieur.

Les applications des interfaces cerveau ordinateur sont ainsi très nombreuses : le contrôle de clavier ou le déplacement d'objets virtuels, la conduite de véhicules à roue (fauteuil roulant ou véhicule radioguidé), le contrôle de membres artificiels (main, bras) ou le contrôle d'exosquelettes. Les recherches s'étendent aussi aux jeux vidéo et à la réalité virtuelle. Enfin, les interfaces cerveau ordinateur sont également utilisées dans un contexte expérimental afin d'étudier en temps réel les réponses cérébrales à des stimuli, ou de procéder à des rééducations. Si le champ de recherches est vaste, les applications à visée non thérapeutique sont encore loin d'être opérationnelles.

■ 2- UN ETAT DE L'ART DES RECHERCHES

L'idée d'une communication directe entre le cerveau et un dispositif externe a trouvé un ancrage technologique concret avec le développement de l'imagerie cérébrale fonctionnelle et des progrès réalisés dans la compréhension du fonctionnement cérébral. La capacité à réaliser une mesure de l'activité cérébrale à l'aide d'un capteur, à séparer des états différents à l'aide d'algorithmes de classification et à déclencher une commande sans action motrice (mouvement ou parole), est actuellement possible en laboratoire. Bien que de nombreux points durs technologiques existent, l'essor de ce type de technologie est porté par plusieurs axes d'application possibles :

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme et implications pour la Défense

- le premier vise à répondre au handicap physique. L'objectif de restaurer les fonctions motrices d'un paralysé a un impact fort sur les programmes de réhabilitation. De même, le remplacement de membres amputés par des prothèses cybernétiques est un objectif partiellement atteint. Cet axe de recherche est considéré comme la motivation historique de la recherche sur les ICM, débutée dans les années 70.
- le deuxième est la commande directe de système en dehors de tout handicap. Elle compose essentiellement la sphère prospective militaire. Cet axe de recherche vise à améliorer l'opérateur humain et/ou de lui permettre d'utiliser le système plus efficacement. Une autre application qui s'en approche est le jeu vidéo.
- le troisième consiste à améliorer les interfaces hommes-machines traditionnelles. Il s'agit de rapprocher la communauté travaillant sur les ICM et les spécialistes des interfaces hommes-machines. Les ICM peuvent alors améliorer l'interface homme-machine via la surveillance par exemple de l'état mental des utilisateurs en vue de l'optimisation de leur charge de travail.

Un panorama des recherches menées actuellement

Une note de veille technologique⁸ publiée en septembre 2009 par le CAS (Conseil d'Analyse Stratégique) retrace l'historique des recherches civiles.

⁸ <http://www.strategie.gouv.fr/content/note-de-veille-n%C2%B0150-septembre-2009-analyse-les-interfaces-cerveau-machine>, note de veille du CAS, septembre 2009, consulté le 17 novembre 2011.

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme et implications pour la Défense

La recherche sur l'animal est historiquement pionnière et se poursuit de façon active. Dans le cadre de ce travail, seules les ICM humaines seront considérées.

La recherche en France autour des implants invasifs est encadrée par la loi de bioéthique ce qui limite fortement leur utilisation. On peut ainsi citer un certain nombre de travaux récents ayant recours à des d'implants semi-invasifs ou utilisant des casques sur le crâne. Les implants permettent d'acquérir des signaux de meilleure qualité, mais posent des problèmes éthiques afférents à leur caractère invasif. Il n'existe pas à ce jour de solution adaptée à l'homme. Le projet de développer une neuroprothèse⁹ pour compenser les déficits sensoriels ou/et moteurs a été mené dans plusieurs laboratoires et institutions. Malgré un nombre impressionnant de travaux, les résultats sont encore limités. Le professeur Benabid au CEA-LETI (programme Clinatec¹⁰) vise un objectif plus ambitieux. Il s'adresse à des patients tétraplégiques. L'objectif est de permettre aux malades "placés dans une coquille" (exosquelette type HAL) de pouvoir se déplacer à terme grâce à des neuroprothèses implantées avec une invasivité minimale. La première étape consiste à implanter un premier dispositif à l'horizon 2012 ou 2013 pour mettre en œuvre des interfaces de type souris d'ordinateur ou fauteuil roulant.

Cependant, la majorité des travaux menés en Europe concerne le développement d'implants non invasifs (contrairement aux USA). Nous

⁹ C'est un dispositif composé de capteurs, de connections et de puces électroniques implantées dans le corps pour réparer certaines déficiences nerveuses, exemple des implants oculaires (rétines artificielles) et des implants cochléaires (audition) pour améliorer une situation de handicap.

¹⁰ http://www.cea.fr/technologies/clinattec_nanotechnologies_-20305.consulté le 17 novembre 2011.

proposons ci-après un résumé des recherches les plus répandues en France.

Initié en 2005 sur un financement de l'Agence Nationale pour la Recherche et piloté par l'INRIA et l'INSERM, le projet OpenViBE a abouti en 2008 à la mise au point d'un logiciel permettant de concevoir, construire et tester des ICM. Le logiciel OpenViBE a pour objectif de fournir des outils simples aux chercheurs, aux médecins, aux neurologues, ou tout autre spécialiste pour pouvoir créer des ICM. Le logiciel, aujourd'hui gratuit et disponible en « open-source », a également pour objectif de créer une communauté d'utilisateurs/développeurs, afin de stimuler la recherche et la formation autour des ICM.

Le logiciel traite des données issues de capteurs électrophysiologiques tels que l'électro-encéphalographie (EEG), c'est-à-dire un casque à électrodes posé sur le crâne. Trois prototypes d'applications développés dans le cadre du projet OpenViBE concernent la réalité virtuelle et par extension les jeux vidéo, tandis qu'un autre permet d'aider les personnes lourdement handicapées à saisir un texte sur ordinateur par le biais de l'activité cérébrale. D'autre part, des recherches au CEA-LETI portent actuellement sur la robustesse des casques d'acquisitions des signaux EEG et le traitement robuste des données¹¹. Ces paramètres interviennent dans la qualité des signaux extraits, le confort lié au port du casque et la recherche d'interfaces de commande. Les applications visées sont les jeux, le handicap et l'évaluation de l'état mental de la personne.

Face aux limitations actuelles des ICM, notamment en matière de précision des capteurs et de capacité de contrôle, les recherches en France et à l'étranger se tournent activement vers les ICM hybrides¹². Une ICM

¹¹ <http://sites.google.com/site/robustbcikeyboard/the-team>, dans le cadre du projet ANR ROBIK piloté par le CHU de Garches, consulté le 17 novembre 2011.

¹² PFURTSCHELLER, Gert ; and al ; The Hybrid BCI , *Frontiers in Neuroscience*, 4(0), 2010.

hybride est constituée d'au moins une ICM « classique » couplée à un ou plusieurs autres dispositifs, d'une toute autre nature. Il devient par exemple possible de coupler deux ICM différentes pour ajouter un autre moyen de contrôle de l'activité cérébrale, ou bien optimiser l'utilisation d'une ICM en ajoutant des informations issues de capteurs physiologiques tels que le rythme cardiaque ou les mouvements oculaires¹³.

L'ANR (Agence nationale pour la recherche) a défini dans un atelier de réflexion prospective sur les Sciences et Technologies Cognitives (PIRSTEC¹⁴), des thèmes prospectifs sur les ICM. Cette initiative fédère une quinzaine de laboratoires en France travaillant dans le domaine afin de faire face aux projets développés aux USA et en Europe (cf. projet national BRAINGAIN, projet suisse en neuroprothèse à l'EPFL). En octobre 2009, des axes de recherche ont été identifiés, tels que les systèmes de mesure et de stimulation de l'activité cérébrale, les méthodes de traitement du signal en temps réel et les potentialités d'applications cliniques. Autre trait marquant, le 4 mai 2011, l'Union européenne a sélectionné le projet "Human Brain", qui rassemble treize laboratoires de recherche européens (incluant des groupes en France¹⁵) en vue de la simulation du cerveau humain, avec un financement pouvant aller jusqu'à un milliard d'euros sur dix ans. Ce projet propose de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau. Le développement d'une ICM est une des retombées de ces recherches.

¹³ GAERTNER, Matti ; and al ; Combining a Brain-Computer Interface with Eye Tracking to Develop a New Touchless Interaction Device, *Paper presented at the Fourth International BCI Meeting, Carmel, CA, 2010.*

¹⁴ <http://pirstec.risc.cnrs.fr/ressources/accesfichier/155>, synthèse de l'atelier sur les interfaces cerveau-machine, organisé à Lyon le 6 octobre 2009, consulté le 18 août 2011.

¹⁵ Behavior&Cognition, Stanilas Dahaene, CEA - Ethics& Legal and society, Jean Pierre Changeux, Institut Pasteur.

En vue de capitaliser et de partager les recherches et les connaissances, un effort a été entrepris par différentes instances académiques, notamment européennes, pour mettre en commun leurs compétences et expertises depuis quelques années au travers de plateformes pour les chercheurs et les non spécialistes¹⁶.

Cet état de l'art en France révèle une recherche centrée sur des applications visant le jeu vidéo, le handicap, et l'évaluation de l'état mental de l'utilisateur. La connexion de l'activité cérébrale attire régulièrement l'attention des media et des auteurs de science fiction. Dès lors, il s'agit d'être vigilant sur le décalage entre les possibles à venir et les projections futuristes.

Quelques défis scientifiques pour les années à venir

Les défis scientifiques concernant le développement des ICM sont nombreux. Les relever permettra d'avoir une meilleure compréhension du fonctionnement du cerveau. Quelle zone du cerveau est responsable de tel phénomène ou processus de décision ? Comment le cerveau réagit à certaines stimulations sensorielles ?

Un autre enjeu technologique réside dans l'amélioration des systèmes de capteurs du signal afin d'augmenter le rapport signal sur bruit¹⁷, mais aussi de rendre la technologie exportable hors des laboratoires ou des hôpitaux. Comment réduire leur coût ? Si les efforts sont souvent placés sur la qualité du signal reçu, l'émergence récente des casques d'acquisition électro-encéphalographiques (EEG) dédiés aux jeux vidéo laisse entrevoir

¹⁶ Voir www.future-bnci.org, consulté le 13 septembre 2011.

¹⁷ Les signaux analysés ont systématiquement du bruit de fond, qui peut être dû, par exemple, à des activités mentales involontaires du sujet ou à la superposition des champs électriques de larges populations neuronales. Des techniques de filtrage spatial et temporel sont donc nécessaires en prétraitement du signal d'activité cérébrale.

un déploiement hors du laboratoire, avec une convergence de la qualité des signaux et du design du matériel. La possibilité de développer des électrodes « sèches »¹⁸ est une problématique majeure pour bénéficier d'un casque facile d'utilisation, tout en conservant une bonne qualité de signal. Un autre défi concerne l'exploration de nouvelles techniques de traitement de signal et l'extraction d'indicateurs pertinents : Comment nettoyer les données pour ne conserver que l'activité cérébrale ? Peut-on obtenir un indicateur pertinent pour n'importe quel utilisateur ?

Un autre défi concerne la prise en charge ergonomique du patient interagissant avec ces types de dispositifs et les apprentissages réciproques ; ce point est peu abordé dans les laboratoires de recherche, et constituera une étape clé pour la réussite de ce domaine. Ce point est essentiel pour les applications futures de la défense ; il faudra définir les spécifications ergonomiques pour l'opérateur avant tout développement et les pédagogies facilitant l'apprentissage par les utilisateurs.

La grande variabilité entre les individus impose de construire des bases de données sur le comportement humain et de les mettre à jour par un suivi dans le temps. En effet, les signaux physiologiques de l'utilisateur face à son environnement sont très variables d'un individu à l'autre¹⁹. Une ICM doit être calibrée pour être adaptée à chaque utilisateur, ce qui représente également un challenge important pour toute conception future. Il

¹⁸ Les électrodes sont généralement recouvertes d'un gel pour assurer un bon contact électrique avec la peau. Ce gel est par contre gênant car les cheveux peuvent l'endommager et il a tendance à sécher ou se modifier pendant l'utilisation, ce qui change la qualité du signal. L'objectif futur est d'avoir des électrodes qui puissent être mises directement sur la peau, sans avoir à mettre de gel ou coton humide. Elles seraient plus faciles à poser, et moins gênant après usage.

¹⁹ Nous avons vu que l'usage des ICM repose sur l'identification d'un certain nombre de paramètres neurophysiologiques caractéristiques; outre cela, il est souvent utile de recueillir d'autres types de paramètres comme la fréquence cardiaque, le rythme respiratoire, la posture, la direction du regard pour compléter les informations qui caractérisent l'état du système nerveux central.

convient aussi de mettre au point de nouveaux outils d'analyse (comme le datamining par exemple) pouvant donner un sens aux bases de données constituées.

L'ensemble de ces aspects nous amènent à souligner l'importance sur un plan organisationnel, de réunir des équipes multidisciplinaires à l'image du programme "Clinatec" du CEA-LETI, cité précédemment, comportant ingénieurs, médecins et neurophysiologistes, au sein d'une même entité.

■ 3-APPLICATIONS POUR LA DEFENSE

Aux Etats-Unis, la recherche dans le domaine des ICM dans le contexte militaire a démarré dès les années 70, avec le soutien de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Un ouvrage publié aux Etats-Unis²⁰ en 2008 par un organisme du ministère de la Défense, explore plusieurs domaines de recherche ayant des implications pour la sécurité nationale américaine. Ce rapport dresse un paysage des attentes des recherches sur les technologies cognitives pour les vingt années à venir. En ce qui concerne les ICM, on y trouve des questionnements sur les possibilités de contrôler le cerveau, d'améliorer les performances des combattants, de perturber la motivation de l'ennemi, d'aider le cerveau à supprimer la peur ou la douleur, avec de nombreuses questions éthiques. Le budget de la DARPA pour l'année 2009-2010 comporte le financement d'un programme nommé « Silent Talk »²¹ à hauteur de 4 millions de dollars. Ce projet doit permettre la communication d'homme à homme sur

²⁰ http://www.nap/catalog.php?edurecord_id=12177 Emerging Cognitive Neuroscience and Related Technologies, Committee on Military and Intelligence Methodology for Emergent Neurophysiological and Cognitive/Neural Research in the Next Two Decades, National Research Council, publié en 2008.

²¹ <http://www.wired.com/dangerroom/2009/05/pentagon-preps-soldier-telepathy-push>, Wired Magazine, 2009-05-14, consulté le 16 mai 2011.

le champ de bataille, sans l'utilisation de la parole, sorte de télépathie assistée par ordinateur, en vue de sécuriser les communications au sein des troupes²².

Jonathan Moreno²³, chercheur en bioéthique, retrace les recherches menées par la DARPA sur les applications des neurosciences chez les militaires et signale notamment que l'IRMf, imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, a suscité une énorme quantité de recherches visant à corréliser l'activité de neurones avec des tâches spécifiques, en vue d'applications diverses : détecter le mensonge, augmenter la charge mentale, mieux gérer la peur, traiter et réguler l'information présentée au pilote, lire dans la pensée, ou encore de manière plus opérationnelle :

- la commande de drones et la commande d'armement télé opéré. Le recours à un système d'ICM intégré à un visuel de casque²⁴ pour commander un armement télé opéré permettrait de s'affranchir d'un poste de commande fixe. En ce sens, l'opérateur pourrait déclencher un tir en envoyant un signal cérébral, sans utiliser de boîtier de commande classique.

²² Afin de ne plus dépendre de la communication gestuelle en opérations.

²³ http://www.americanprogress.org/issues/2006/11/brain_research.html, the role of brain research in national defense by Jonathan D. Moreno, 14 nov.2006, consulté le 16 mai 2011.

²⁴ A la base, un casque est un équipement de protection de la tête contre les chocs ou les perforations. On peut ajouter une protection auditive (active ou passive), et une protection des yeux (contre les flashes, les éblouissements, et les lasers). Il est également possible d'ajouter des éléments d'aide à la perception, en particulier pour l'aide à la vision de nuit (on place des jumelles de vision nocturne sur le casque). Enfin, grâce à des technologies de transfert et de projection d'information sur des écrans spéciaux, il est possible de présenter des données tactiques ou des paramètres de vols (altitude, vitesse, etc.). On parle alors de « visuel de casque ».

- la conduite d'exosquelette²⁵. Elle repose actuellement sur une technologie électromécanique. Les mouvements sont analysés par des microcontrôleurs, qui envoient des signaux à des servomoteurs dont le but est d'actionner les mouvements et d'amplifier la force musculaire du sujet. L'intérêt porté aux ICM repose sur la possibilité d'interpréter des signaux permettant d'anticiper des mouvements à l'avance, ou d'intégrer des commandes additionnelles.
- dans le pilotage d'avions de combat à réaction. Dans ce cadre, la perte de conscience est un évènement adverse problématique. La surveillance des états cérébraux comme la fatigue pourrait permettre d'alerter le système suffisamment en amont de la survenue d'une perte de conscience, afin de passer en mode de pilotage automatique avec une série de phases de vols conservatoires préétablies ou guidées par des paramètres et des règles. La surveillance de la vigilance et de l'attention des pilotes de drones fait l'objet d'un programme de recherche mené par l'US Army, dénommé UAV Operators Training and Workload Assessment for Safe Piloting²⁶, où la question de l'évaluation en continu de la charge de travail par une ICM est envisagée.
- l'amélioration des communications, par la sélection de ce qui paraît pertinent pour le sujet, dans les flux d'informations (projet "silent talk", évoqué ci-dessus).

²⁵ Un exosquelette motorisé ou combinaison robotique est un dispositif composé d'une structure mécanique à plusieurs degrés de liberté, d'un système d'actionnement (électrique, hydraulique ou pneumatique) utilisant une source d'énergie, et de cartes électroniques de puissance et de commande, que revêt un individu, à la manière d'un vêtement robotisé ou d'une prothèse externe lui permettant de démultiplier ses capacités physiques et éventuellement de le protéger de son environnement (à la manière d'une carapace ou d'un gilet par balle).

²⁶ http://www.biomed.drexel.edu/fnir/CONQUER/fNIR_Research_files/Abstract_UAV.pdf, consulté le 13 septembre 2011.

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme et implications pour la Défense

- l'amélioration de systèmes d'alerte, avec un couplage entre des lunettes de très haute résolution et une ICM qui répondrait à des cibles détectées de manière inconsciente par le cerveau.
- la lecture dans les pensées. Sur ce point, il convient d'être prudent car on est très loin des réalisations. Deux applications apparaissent au demeurant possibles : une "super" machine apte à détecter les mensonges et une retranscription des images visuelles d'un individu sur écran.

Au final, toutes ces applications apparaissent bien lointaines. Il semble que le laboratoire de recherche de l'Armée américaine (Army research lab)²⁷ prend une autre direction, plus pragmatique, en favorisant les études sur les ICM comme superviseur et soutien de l'opérateur (contrôle de la vigilance, prévision d'erreurs de décision, état de stress)²⁸. L'accent est mis sur des technologies portables, plus sûres et non vulnérables. Ainsi, une ICM devrait pouvoir être réellement portée sur la tenue de combat d'un fantassin, être autonome en énergie avec des batteries adaptées, et ne pas être susceptible de devenir une source de projectiles secondaires en cas d'exposition à une explosion de mine ou d'engin explosif improvisé. En ce qui concerne les recherches militaires menées en France sur les ICM, elles sont peu nombreuses et sont plutôt du ressort de la veille scientifique.

²⁷ <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA538505>, 2010 Neuroscience Director's Statégie Initiative, Février 2011, consulté le 1 Décembre 2011.

²⁸ Information recueillie par un membre du groupe de travail lors d'une visite.

■ 4- LIMITES DES ICM EN LIEN AVEC LES LIMITES DU CERVEAU

Malgré l'essor des neurosciences et des techniques d'imagerie cérébrale²⁹, le fonctionnement du cerveau humain reste encore mal connu sur de nombreux points. Lors de la conception et de la mise en œuvre des ICM, il est important d'avoir une réflexion sur ce qui est possible pour le cerveau humain, et ses limitations naturelles. Quatre questionnements essentiels permettent de rendre compte de ces limitations :

- Est-ce que le cerveau a suffisamment de capacité d'adaptation pour permettre le fonctionnement de tout type d'ICM, dans toutes conditions ? Une situation dans laquelle le cerveau ne se montre pas particulièrement performant est le multitasking (faire plusieurs tâches en même temps). Si on cherche à utiliser une ICM pour piloter plusieurs drones ou plusieurs bras articulés par exemple, les performances vont dramatiquement chuter. Il faut impérativement considérer la charge mentale générée par la mise en œuvre d'ICM. A ce jour, elle est très importante même pour des systèmes simples. Pour la réalisation de tâches complexes, il est possible que la charge mentale nécessaire dépasse finalement les capacités du cerveau, en particulier s'il n'arrive pas à s'adapter aux tâches demandées même après un entraînement spécifique. De plus, l'apprentissage nécessaire pour maîtriser l'interface, et la pédagogie associée devraient faire l'objet de développements, déjà signalé dans les défis scientifiques.

²⁹ Voir le projet Neurospin, CEA, Saclay porté par Denis le Bihan.

- Que sait-on réellement du fonctionnement cérébral ? Il est difficile de pouvoir répondre à une telle question, malgré de très importantes découvertes dans les domaines de la perception, de la prise de décision, de l'émotion. En fait, le champ d'explorations de recherche des neurosciences est très prometteur. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, est une technique qui s'est imposée, en quelques années, comme l'outil idéal, non invasif, indolore, pour suivre en direct l'activité du cerveau. Cette technique associée à de puissants calculs informatiques devrait permettre la mise au point de décodeurs, susceptibles de lire dans le cerveau, les images et les sons que nous percevons, de lire certaines de nos pensées. Mais le modèle informatique assez puissant pour décoder les milliards de données enregistrées manque. C'est un des objectifs du projet "Human Brain" cité précédemment.
- Que peut-on mesurer comme activité cérébrale ? Malgré les très grands progrès techniques, il est seulement possible en pratique d'enregistrer une activité de surface, qui est une somme de signaux provenant de sources à la fois superficielles (cortex) et profondes (noyaux profonds du cerveau). Certes, il est possible d'utiliser certains de ces signaux dans des interfaces assez simples (discrimination entre deux états par exemple), dans le cadre d'une tâche précise (recherche d'une cible dans des images satellites). Cela devient plus compliqué si l'on sort d'une tâche contrôlée (conduite de véhicule en terrain libre), et si l'interface doit réagir à un contexte non connu. Dans ce dernier cas, la question de l'apprentissage de l'interface elle-même se pose. De plus, les conditions réelles d'utilisation nécessitent un recueil des données par des dispositifs peu encombrants, portables, voire au design agréable. Le challenge technique est donc fort.

- Est-ce utile de passer par une ICM alors que je peux utiliser mes mains ? Cette question illustre bien la frontière entre l'imaginaire (qui n'a pas entendu parler de télékinésie, un pouvoir supposé faire bouger les objets à distance uniquement par sa volonté ?) et la réalité d'une situation opérationnelle. L'usage des capacités développées par l'homme sur des milliers d'années et perfectionnées par l'entraînement, font que l'utilité même d'un système ICM doit bien être évaluée pour être une aide à la réalisation d'une tâche et non devenir un obstacle.

■ 5- PHARMACOPÉE ET DYSFONCTIONNEMENT DES ICM

Les ICM dont l'efficacité et le contrôle nécessitent une parfaite corrélation entre l'activité électrique cérébrale et le dispositif externe pilotable, doivent être utilisés par des opérateurs sains, en bonne santé, ne prenant aucune substance pharmacologique. Toute altération de l'activité électrique cérébrale fait encourir le risque de dysfonctionnement du dispositif externe. Différentes situations sont susceptibles d'affecter l'activité électrique cérébrale et constituent ainsi des facteurs limitant l'utilisation potentielle des ICM, pour certaines d'entre elles difficiles à maîtriser ou à gérer. C'est par exemple le cas de la prise de médicaments comme les psychotropes.

Parmi les médicaments pouvant être aussi utilisés, les psychoanaleptiques, substances psychotropes considérées comme des excitants psychiques, ont une place à part. Elles peuvent être classées en quatre grandes catégories, les psychostimulants (qui accélèrent l'activité du système nerveux et stimulent l'humeur), les psychédéliques (qui perturbent le

fonctionnement du système nerveux central), les psychosédatifs (qui sont des hypnotiques ralentissant le fonctionnement du système nerveux central), et les antidépresseurs (qui sont des stimulants de l'humeur). Les stimulants de la vigilance (amphétamines) améliorent les performances psychiques au plan de l'idéation (formation et enchaînement des idées). Selon les individus, la production d'idées par un sujet peut être soit riche, foisonnante, hypertrophiée, soit pauvre et rare. Certaines substances chimiques permettent de les favoriser (amphétamines) ou de les inhiber (hypnotiques), ce qui a des conséquences sur l'activité électrique cérébrale et le pilotage d'éventuel de dispositifs externes. Il en va de même pour des psychostimulants ou excitants cérébraux comme la caféine. Les molécules pouvant être impliquées dans la déstabilisation de l'ICM sont celles qui passent la barrière hémato-encéphalique, qui sont susceptibles de modifier les états mentaux ou la physiologie cérébrale, et d'altérer l'activité électrique cérébrale. Ces substances peuvent affecter le pilotage du dispositif externe. Chez le militaire en opérations, plusieurs situations peuvent conduire à l'utilisation de substances psychotropes : l'opérateur bénéficie d'une prescription thérapeutique, dans le cadre d'une pathologie. La question de son aptitude à l'emploi est posée, et l'utilisation d'une ICM doit absolument être interdite. Si l'opérateur est sujet à la prescription d'un psychotrope à effet éveillant sur la demande du commandement, dans le cadre d'une opération soutenue de longue durée (mais toujours avec son accord), l'utilisation d'une ICM doit être évitée, si ce n'est interdite. Le cas le plus difficile à résoudre est celui de l'automédication avec une substance psychotrope, avec pour objectif de reculer la survenue d'un état de fatigue, ou de parfaire la gestion du rythme veille/sommeil. L'efficacité d'une ICM et la sécurité de son emploi sont donc étroitement liées au respect de l'interprétation automatisée de l'activité électrique cérébrale. L'utilisation de la pharmacopée psychotrope

modifiant cette activité ne peut pas être envisagée, et ce pour des raisons de sécurité dans le pilotage du dispositif externe.

■ 6- LA PROTECTION DES DONNEES PERSONNELLES

La mesure des états cérébraux posent des questions éthiques d'utilisation, liées à la sécurité des sujets et à la confidentialité des enregistrements. En effet, un problème majeur qu'il ne faut pas omettre si on utilise un jour une ICM, est que les données mesurées sur un sujet, font l'objet d'une protection en raison de l'impératif de préservation de la vie privée. La protection des données collectées sur les individus au moyen des neurosciences, représente donc un enjeu très sensible. En effet, la collecte de données brutes, leur traitement, leur conservation et les utilisations potentielles, peuvent susciter de nombreuses questions en termes de consentement, de confidentialité, de non-discrimination ou encore de droit à l'information³⁰. Ainsi les ICM invasives ou non, soulèvent des questions relatives à l'utilisation des données personnelles.

Les risques pour le respect des libertés individuelles et la protection de la vie privées sont accrus par l'implication d'acteurs privés comme les banques, les compagnies d'assurances ou en encore des cabinets de recrutement, qui pourraient par exemple chercher à obtenir ces données à des fins de sélection. Du fait de la sensibilité de ces données et des risques liés à leur détournement, il convient de s'interroger sur l'effectivité du cadre juridique relatif à la protection des données personnelles.

³⁰ <http://www.strategie.gouv.fr/content/note-de-veille-n%C2%B0128-mars-2009-analyse-impacts-des-neurosciences-quels-enjeux-ethiques-pour->, note du Conseil d'analyse stratégique, publié en mars 2009, consulté le 12 septembre 2009.

La loi relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés du 6 janvier 1978 modifiée notamment par la loi du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel³¹ impose des règles strictes pour les traitements de données personnelles. Aussi, il convient de déterminer si l'activité électrique du cerveau d'un individu doit être appréhendée comme une donnée personnelle, ce qui aurait pour conséquence de soumettre les traitements de données réalisés au moyen d'ICM aux dispositions de la loi du 6 janvier 1978.

En captant, transmettant et analysant l'activité électrique du cerveau de l'utilisateur, les ICM opèrent incontestablement un traitement de données au sens de la loi informatique et liberté. Toutefois réalisent-elles un traitement de données personnelles ?

Les données personnelles de santé permettant d'identifier un individu constituent des données sensibles susceptibles de révéler l'intimité de la vie privée des personnes concernées et font en conséquence, l'objet d'une protection spécifique. Le droit leur reconnaît un statut particulier et impose le respect de règles ayant pour objectif de garantir leur confidentialité. Par principe, les données personnelles dites sensibles font l'objet d'une interdiction de traitement qui ne connaît que certaines exceptions. Ces dernières sont mentionnées à l'article 8 de la loi du 6 janvier 1978 et les traitements de données justifiés par l'intérêt public ne sont pas concernés par le principe d'interdiction de traitement des données sensibles. Ainsi, nonobstant leur qualification de données de

³¹ Loi n°2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel, *JORF*, n°182 du 7 août 2004 page 14063, texte n° 2.

santé, les données relatives à l'activité électrique du cerveau de l'utilisateur d'une ICM peuvent être traitées si l'intérêt de la défense le justifie. Précisons toutefois, que la mise en œuvre du traitement devra au préalable être autorisée par arrêté ou par décret après avis motivé de la CNIL.

Une autre exception au principe d'interdiction de traitement des données sensibles présente un intérêt dans le cas des ICM, celle du consentement de l'intéressé. En effet, un traitement de données sensibles peut être autorisé si la personne concernée y consent expressément³². Cette exception permet d'envisager un traitement des données cérébrales de l'utilisateur dans le cadre d'une utilisation civile (et hors cadre médical) des ICM.

Bien que la CNIL précise dans sa délibération relative aux traitements de données de santé à caractère personnel³³ « *que les données de santé à caractère personnel ne peuvent être utilisées que dans l'intérêt direct du patient et, dans les conditions déterminées par la loi, pour les besoins de la santé publique et que, dès lors leur exploitation à des fins commerciales doit être proscrite* », cette interdiction ne concerne que les praticiens. En d'autres termes, l'exploitation des données de santé à des fins commerciales ne fait pas l'objet d'une interdiction absolue. En effet, dès que la personne y consent expressément, ses données personnelles de santé peuvent faire l'objet d'un traitement. Le responsable de traitement devra au préalable avoir déclaré le traitement envisagé auprès de la CNIL et se soumettre aux exigences de la loi informatique et liberté qui impose en toute hypothèse le respect de règles destinées à garantir notamment la sécurité des données, leur confidentialité ainsi que le respect des droits

³² Loi « Informatique et libertés », art 8-II 1.

³³ CNIL, Délib. 97-008 du 4 février 1997 portant adoption d'une recommandation sur les traitements de données de santé à caractère personnel.

des personnes dont les données sont traitées. Celles-ci doivent être traitées loyalement et licitement, mais également être collectées pour des finalités déterminées, explicites et légitimes.

La loi informatique et liberté offre en définitive un haut degré de protection. Toutefois, il convient de s'interroger sur l'effectivité de cette protection dans le domaine des ICM. Celles-ci sont susceptibles de trouver des applications dans les domaines, de l'informatique, du jeu vidéo, des services à la personne, etc. Est-il légitime de permettre à une multitude d'opérateurs civils d'avoir accès aux données cérébrales de leurs clients. Le cadre juridique actuel peut-il permettre de protéger efficacement de telles données ?

Il appartiendra au législateur de se prononcer sur ce point. De même les risques de mésusage ou de détournement de données collectées au moyen des ICM devront être impérativement envisagés. Les ICM pourraient être utilisées à des fins de neuromarketing, dans le secteur de l'assurance ou encore dans le cadre de procédures de recrutement professionnel, afin de contourner les dispositions de l'article 16-14 du Code civil au terme duquel *« les techniques d'imagerie cérébrale ne peuvent être employées qu'à des fins médicales ou de recherche scientifique, ou dans le cadre d'expertises judiciaires. Le consentement exprès de la personne doit être recueilli par écrit préalablement à la réalisation de l'examen, après qu'elle a été dûment informée de sa nature et de sa finalité. Le consentement mentionne la finalité de l'examen. Il est révocable sans forme et à tout moment »* ». Cette première disposition législative visant à encadrer les pratiques issues des neurosciences a été introduite en droit français par la loi du 7 juillet 2011 relative à la

bioéthique³⁴ afin de se prémunir contre les dérives observées³⁵ outre-Atlantique en matière d'utilisation de l'imagerie dans le monde professionnel et social, dans les recrutements ou encore dans le secteur de l'assurance. Cependant, l'article 16-14 du Code civil n'a pas vocation à intégrer dans son champ d'application la problématique des interfaces cerveau-machine. Peut-être conviendrait-il d'élargir ce principe de restriction d'utilisation des techniques d'imageries cérébrales à l'utilisation de dispositifs fonctionnant sur le même principe que l'EEG. Une telle extension serait certes protectrice des droits des personnes mais présenterait l'inconvénient de stopper net le développement des ICM sur le territoire national, privant *de facto* la France de retombées économiques potentielles.

■ 7- QUESTIONNEMENTS ETHIQUES ET JURIDIQUES

« Les neurosciences constituent un des champs où le domaine de l'éthique est le plus fragile. En touchant au cerveau, on touche au cœur même de l'espèce humaine, à son âme même pour certains. [...] C'est donc l'essence même de l'humain qui risque d'être mise en cause »³⁶. Cette déclaration du Professeur J.-D. Vincent devant l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques résume à elle-seule la difficulté d'appréhender les problématiques éthiques et juridiques afférentes aux neurosciences. Composante des neurosciences, les ICM, et plus

³⁴ Loi n° 2011-814 du 7 juillet 2011 relative à la bioéthique, J.O.R.F. n°0157 du 8 juillet 2011, p. 11826 .

³⁵ En effet, plusieurs sociétés de services ont été créées aux États-Unis dans le but de proposer des consultations de détection de mensonges fondées sur l'interprétation d'IRM fonctionnelle; voir note bas page 29.

³⁶ OPECST, compte rendu de l'audition publique du mercredi 7 octobre 2009, « Exploration du cerveau, neurosciences : avancées scientifiques, enjeux éthiques ».

particulièrement les ICM invasives, soulèvent en effet de nombreuses interrogations éthiques et juridiques. Plus précisément, elles interpellent le juriste, car elles le conduisent à s'interroger sur des problématiques cardinales telles que la dignité de la personne ou plus largement la notion d'identité humaine.

Ainsi, comment ne pas s'interroger sur la licéité des ICM invasives en l'absence de nécessité thérapeutique ?

Les interventions sur le corps humain sont notamment encadrées par les dispositions de l'article 16-3 du Code civil qui dispose qu'« il ne peut être porté atteinte à l'intégrité du corps humain qu'en cas de nécessité médicale pour la personne ou à titre exceptionnel dans l'intérêt thérapeutique d'autrui. Le consentement de l'intéressé doit être recueilli préalablement hors le cas où son état rend nécessaire une intervention thérapeutique à laquelle il n'est pas à même de consentir ».

A la lumière de cette disposition, il apparaît qu'il ne peut être porté atteinte à l'intégrité du corps humain qu'à la double condition que l'intervention soit médicalement nécessaire et que la personne subissant l'intervention y consente. Le consentement de la personne et la nécessité médicale constituent donc en principe, des préalables indispensables à l'intervention sur le corps. Toutefois, cette assertion doit être tempérée dans la mesure où la valeur de ces deux conditions est variable selon les situations considérées. Ainsi, en matière de chirurgie à visée esthétique ou de perçage corporel, la condition de la nécessité médicale s'efface³⁷ au

³⁷ La condition de nécessité médicale s'efface mais ne disparaît pas. En effet, bien que l'intervention de chirurgie esthétique ne soit pas justifiée par une nécessité thérapeutique, elle trouve une justification médicale dès lors qu'elle concourt à préserver la santé psychique ou le bien être de la personne. Ainsi la notion de nécessité médicale doit être appréciée au regard de la définition de la santé donnée par l'OMS : « un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité ».

profit de la condition du consentement de l'intéressé qui l'emporte quasi exclusivement, pour la licéité de l'intervention.

En raisonnant par analogie, l'implantation d'ICM sans nécessité thérapeutique pourrait être considérée comme licite dès lors que l'individu y consent expressément. Or, le respect du principe de dignité impose que le consentement de la personne soit préalablement éclairé par une information loyale, claire et de qualité. Cette exigence est reprise au sein des dispositions de l'article L.1111-4 du Code de la santé publique qui précise que le consentement du patient doit au préalable avoir été éclairé par une information délivrée par le professionnel de santé.

Or en matière d'ICM invasives, quelle sera la teneur de l'information délivrée à la personne ? Tout d'abord concernant les risques de l'intervention, il convient à titre liminaire de considérer dans l'éventualité où les ICM invasives seraient reconnues licites en l'absence de nécessité thérapeutique, qu'elles ne pourraient être mises en œuvre qu'à la condition de présenter une balance bénéfice/risque positive. Ainsi, en l'état actuel de l'art médical, il est exclu que de telles interventions puissent être pratiquées en l'absence de nécessité thérapeutique au regard des risques importants qu'elles supposent.

Toutefois, si les risques inhérents étaient à l'avenir significativement réduits, quelle serait la nature de l'information délivrée au patient ? Sur les conséquences d'une intervention, le praticien doit-il informer son patient des conséquences sociales de l'implantation d'une ICM, des éventuelles conséquences psychiques résultant d'un sentiment de perte d'autonomie, de la nécessité de procéder à l'entretien du dispositif implanté ou encore du coût financier de cette maintenance, de la réversibilité ou de l'irréversibilité de l'intervention, etc. ?

Les ICM invasives soulèvent évidemment bien d'autres interrogations auxquelles il convient de répondre afin de déterminer l'acceptabilité de

pratiques visant à hybrider l'homme et la machine à des fins non-médicales. Ainsi, quel est l'impact potentiel des ICM invasives sur le principe de non-discrimination ou sur le principe d'égalité ? Dès lors que les ICM sont susceptibles d'induire une augmentation des performances humaines, elles sont

corrélativement capables d'engendrer une rupture d'égalité entre les individus implantés et les non-implantés³⁸. Cette question de l'impact social des ICM doit à notre sens être au centre de la réflexion. Toutefois, force est d'admettre que la réponse ne peut être formulée au détour d'un raisonnement purement juridique et relève pour l'essentiel d'un choix de société.

En définitive, en ce qu'elles touchent à l'une des composantes majeures de l'identité humaine, les neurosciences doivent faire l'objet de toutes les attentions. Porteuses de lourdes conséquences sociétales, elles constituent un défi pour le droit dont la fonction première est la régulation du corps social. La composante invasive de cette technologie marque a fortiori un changement de paradigme dans les rapports qu'entretient l'homme avec la technique. Avec les ICM, l'« humanité imprégnée de technique »³⁹ cède la place à une humanité hybridée de technique, une techno-humanité. Comme le relève le Professeur H. CHNEIWEISS « l'activité de notre cerveau est à la fois l'origine et l'émergence de la pensée, de la perception et de

³⁸ Toutes ces questions d'acceptabilité ont déjà été soulevées dans le rapport final du groupe de travail IRSEM sur l'augmentation des performances humaines avec les nouvelles technologies, mai 2010, http://www.irsem.defense.gouv.fr/IMG/pdf/Travaux_de_l_Irsem_no2.pdf, consulté le 17 novembre 2011.

³⁹ SAVATIER, René ; « Le droit et le progrès technique », UNESCO, *Bulletin international des sciences sociales*, vol. IV, n°2, été 1952, p. 326.

l'action, ainsi que l'expression de notre identité personnelle »⁴⁰. Bien que les problématiques d'homme augmenté au moyen de l'implantation de puces informatiques dopant ses capacités mnésiques ou cognitives n'appartiennent pour l'heure qu'au domaine du fantasme voire au domaine de la science fiction, les ICM, aussi balbutiantes qu'elles soient, soulèvent des interrogations nombreuses et complexes auxquelles le droit doit dès aujourd'hui accorder toute son attention.

Or, si la doctrine juridique porte un intérêt grandissant à l'étude des neurosciences, force est de constater que la problématique de l'interface cerveau-machine est pour l'heure peu traitée. Comme le relevait le Professeur Bertrand MATHIEU⁴¹ lors de son audition par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques, « il est nécessaire pour les juristes de réfléchir en amont des développements de la science. Dès lors que l'on raisonne sur un système de valeurs et sur un encadrement, on ne peut pas simplement chercher à s'adapter au plus juste aux évolutions de la science. En matière d'implants, par exemple, comment pourra-t-on, matériellement, établir une frontière entre des actions de rétablissement et d'amélioration des fonctions ? On perçoit bien la possibilité d'entrer dans une logique d'eugénisme, c'est-à-dire d'amélioration de l'espèce humaine, qui pose également un problème d'égalité d'accès à ces techniques, au risque que l'inégalité sociale naturelle se transforme en une inégalité touchant à l'exercice des fonctions. Certes, nous sommes en démocratie. Mais qui décidera de la

⁴⁰ OPECST, compte rendu de l'audition publique du mercredi 26 mars 2008, « Exploration du cerveau, neurosciences : avancées scientifiques, enjeux éthiques ».

⁴¹ Professeur à l'Université Paris I, président de l'Association française de droit constitutionnel.

frontière entre le rétablissement et l'amélioration ? Les scientifiques ? Le législateur ? Sur quels critères ? »⁴².

■ 8- REFLEXIONS SUR LES POSSIBLES ET L'IMAGINAIRE AVEC LES NOUVELLES TECHNOLOGIES

Appréhender les ICM à partir d'une lecture mythologique et fictionnelle peut nous apporter de précieuses informations car ce regard révèle les attentes, les visions du futur et la façon dont

les préoccupations d'une époque se retrouvent aujourd'hui au sein des recherches technologiques. En outre, ces imaginaires technologiques alimentent souvent, en filigrane, les espoirs associés aux recherches et aux expérimentations, qu'elles soient ou non à but thérapeutique. Les ICM sont fortement imprégnées de l'imaginaire de la communication directe par la « pensée », et de l'interaction directe entre l'homme et la machine. Ainsi, ces dispositifs technologiques véhiculent de nombreux mythes et imaginaires. Au-delà des applications thérapeutiques et des bénéfiques communicationnels qui leur sont associés, il s'agit de cerner les modalités possibles de fusion entre la chair et le métal dans la littérature et les travaux de cybernétique.

Le développement et les exemples qui suivent s'appuient sur des recherches effectuées par Daniela Cerqui et Barbara Müller récemment publiées dans un numéro spécial de la revue canadienne *Sociologie et*

⁴² Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques sur l'évaluation de l'application de la loi n° 2004-800 du 6 août 2004 relative à la bioéthique, p.232.

*Sociétés*⁴³. Les auteurs soulignent que certains scientifiques, et pas seulement des écrivains, jouent un rôle fort, de médiateurs des représentations collectives, dans la diffusion collective des imaginaires fictionnels associés aux nouvelles technologies⁴⁴. Ils soulignent également le fait qu'il n'est pas rare que des auteurs de science-fiction portent également la casquette de scientifique. L'écrivain Isaac Asimov, docteur en biochimie et professeur à l'université de Boston – est le cas le plus exemplaire⁴⁵. Le sujet des ICM nous amène à décrire les rapports imaginés par les auteurs de science-fiction entre l'animé et l'inanimé. Cette hybridation interroge la notion même d'humanité, dont l'essence et les limites se voient bouleversées par la science et la technique.

Plusieurs dimensions sont associées à cet imaginaire de l'hybridation cerveau-machine :

- L'information pour le contrôle. Le développement d'interface matérielle visible ou invisible⁴⁶ homme-système nerveux tend vers un contrôle des activités de la vie sociale. De nombreux thèmes de science-fiction ont développé des scénarii où des individus sont constamment localisés et ne peuvent échapper à ceux qui les observent. Dans le roman de science fiction *Hypérion* écrit par l'auteur américain Dan Simmons, le « cube traceur » se dissout dans une boisson et permet, moyennant des lunettes

⁴³ CERQUI, Daniela ; MULLER, Barbara ; « La fusion de la chair et du métal : entre science-fiction et expérimentations scientifique », TOURNAY, V. (dir.), *Quand le vivant devient politique : les avatars de la démocratie technique*, Revue Sociologie et Sociétés, n°2, automne 2010, p. 43-65.

⁴⁴ On pense ici à Kevin Warwick par exemple : ingénieur et professeur au département de cybernétique de l'université de Reading en Grande Bretagne. Il ambitionne de devenir le premier représentant d'une nouvelle espèce (!) : le cyborg, qu'il définit comme une fusion du système nerveux humain avec des machines.

⁴⁵ WHITE, Michael ; *Asimov: The Unauthorized Life*, 1994.

⁴⁶ Par exemple, la greffe d'un implant sur un nerf. L'échange d'information devient ici bidirectionnel.

adaptées, de repérer et suivre la personne ayant ingéré le produit. Dans le film de Steven Spielberg *Minority Report*, le scannage rétinien est une pratique généralisée. Elle sert de titre de transport : les gens présentent leurs yeux en levant le visage en entrant dans le métro.

- L'imaginaire cyborg⁴⁷. Le cyborg est à la base un humain dont les fonctions organiques sont secondées par des systèmes technologiques pour lui permettre de survivre dans des environnements étrangers, suite à un accident, pour pallier à une déficience ou augmenter ses capacités. Le terme de cyborg – *cybernetic organism* – fut forgé par Clynes et Kline en 1961, deux scientifiques de la NASA travaillant sur le problème de l'homme dans l'espace et de ses adaptations et survie dans cet environnement hostile. Cette adaptation doit passer par une intégration du non-vivant et du vivant, de la chair et du métal. Le métal, plus qu'une matière, désigne ici un procédé et une logique, englobant différentes matières. Il peut s'agir de chimie – le Prozac qui régule l'humeur, la Ritalin qui peut améliorer les capacités de réflexion et de mémorisation. Il peut s'agir de prothèses, extérieures comme des exosquelettes⁴⁸, intégrées comme les jambes du coureur sud-africain Oscar Pistorius ou intérieures, comme c'est le cas pour les expérimentations de Kevin Warwick⁴⁹. Nombreux sont les personnages de fiction étant devenus des cyborgs suite à un accident.

⁴⁷ Les ICM rejoignent davantage l'imaginaire cyborg que celui de l'androïde ou du robot. Ces derniers correspondent à des machines « humanisées », alors que le premier cas renvoie à un humain « machinisé », bien plus proche des ICM qui utilisent l'influx nerveux comme ressort premier.

⁴⁸ L'entreprise japonaise Cyberdyne loue des exosquelettes qui, fixés au bassin, capturent les signaux envoyés par le cerveau pour décupler la force musculaire de manière coordonnée. Il en coûte environ 1600 € par mois.

⁴⁹ Voir le site : <http://www.kevinwarwick.com/> consulté le 1^{er} décembre 2012.

- L'expérimentation menée sur un humain et ses effets. Le récit fictionnel exemplaire discutant les conséquences sociales et éthiques de travaux conduits sur l'homme est illustré dans le célèbre ouvrage de Shelley (1818), intitulé *Frankenstein*. Le savant utilise l'électricité dont la maîtrise est récente pour bricoler et donner vie à un être dont on connaît le destin tragique.

La déshumanisation par la recherche de l'augmentation des compétences cognitives/physiques ou l'atteinte d'une perfection organique. *Le meilleur des mondes* (Huxley, 1931) met en scène un être humain fécondé en laboratoire, conditionné et déterminé dans son appartenance à une des cinq castes qui constituent cette société tandis que *The Island* (Bay, 2005), décrit un monde où les gens aisés peuvent se permettre de faire fabriquer leur clone, individu qui vit dans une société artificielle en attendant, dans l'ignorance la plus totale, que sa « version originale » ait besoin d'un organe de rechange. *Les plus qu'humains* (Sturgeon, 1952) est un roman qui raconte l'apparition d'une race humaine nouvelle et supérieure, posant la question de la cohabitation avec les gens « normaux » et de la responsabilité que confère la supériorité, thématique qui est aussi au cœur de la série des *X-Men* (Singer, 2000 et 2003, Ratner, 2006). Sur un autre plan, dans le domaine de la recherche, la convergence des technologies est parfois vue comme une possibilité d'améliorer la santé de l'homme mais aussi d'augmenter ses performances. Ce courant de recherche est désigné aux USA, par l'acronyme NBIC (pour Nanotechnologies, Biotechnologies, technologies de l'Information et sciences Cognitives). Cette convergence se manifeste par la mise au point d'implants, de prothèses, d'exosquelettes, de nanobots⁵⁰ permettant la délivrance de médicaments, et surtout pour notre propos de complexes ICM. Différentes instances définissent les usages à venir de ces technologies comme une voie possible

⁵⁰ Contraction de nanorobots.

d'amélioration des performances de l'être humain. Ainsi, la National Science Foundation américaine a publié en 2002 un rapport "*Technologies convergentes pour améliorer les performances humaines*" qui traitait de la question. Ce rapport vise à l'unification des sciences et à l'accroissement des performances humaines grâce à des effets de synergie entre quatre composantes scientifiques N,B,I,C. Si on se penche sur l'univers des possibles, ce sujet donne lieu à des questionnements de nature philosophique et éthique. Avec le projet d'imiter la nature, voire de la surpasser, le "programme NBIC" accentue la confusion entre le naturel et l'artificiel, avec le risque de modifier le socle de nos valeurs culturelles. Pour certains, en explorant les virtualités d'un humain "augmenté", c'est également le devenir de l'espèce humaine dans sa forme biologique qui est questionné par cette convergence technologique. Ces anticipations rejoignent tout un ensemble de réflexions autour de l'avenir de l'espèce humaine, de son éventuel dépassement vers un post-humain et sont au cœur de doctrines philosophiques telles que le transhumanisme⁵¹.

⁵¹ Courant philosophique international prônant l'usage des nouvelles technologies en vue d'améliorer les caractéristiques physiques et mentales des êtres humains-voir la conférence de Jean-Didier Vincent donnée au CHEAR le 5 mars 2009, <http://www.chear.defense.gouv.fr/fr/colloques/restitution/2009/Jean-Didier%20Vincent%20V2.pdf>, consulté le 15 septembre 2011.

■ CONCLUSION

Les ICM rejoignent l'imaginaire de la communication directe par la « pensée », et de l'interaction directe entre l'homme et la machine. Ainsi, ces dispositifs technologiques sont imprégnés de nombreux mythes et imaginaires sur les possibles. La connexion technologique de l'activité cérébrale attire d'ailleurs régulièrement l'attention des media et des auteurs de science fiction. Cette entrée des ICM dans la vie publique nous invite à être vigilants sur le décalage entre les possibles à venir et les projections futuristes.

Cette toute première analyse prospective sur les ICM pour les applications militaires dresse un panorama des recherches académiques principalement sur les dispositifs non invasifs (recueil des signaux à la surface du crâne). La recherche de défense en France est encore peu impliquée dans la problématique.

Depuis plus d'une dizaine d'années, le nombre de laboratoires travaillant sur les ICM non invasifs a crû significativement. Les principaux points durs sont la qualité des signaux électro physiologiques recueillis sur le terrain, la variabilité de ces signaux entre les sujets, leur interprétation, l'indexation des données, le développement d'outils performants pour fouiller ces données, ainsi que les questions d'ergonomie et l'apprentissage des dispositifs par les utilisateurs. Les applications visées par les ICM sont principalement, le suivi des états internes de l'opérateur (fatigue, attention, vigilance, stress), les communications (programme "silent talk" ou télépathie assistée par ordinateur, cité au paragraphe 3) et les commandes systèmes. Cet ordre reflète, à notre sens, les perspectives de leur application dans le domaine de la défense.

Par ailleurs, la mesure des états cérébraux pose des questions d'utilisation et de respect du droit, liées à la sécurité des patients et à la confidentialité

des enregistrements. La protection des données issues des neurosciences, représente un enjeu très sensible. En effet, la collecte de données brutes, le traitement, la conservation et les utilisations potentielles de celles-ci peuvent susciter de nombreuses questions en termes de consentement, de confidentialité, de non-discrimination, ou encore de droit à l'information. Les risques pour le respect des libertés individuelles et la protection de la vie personnelle sont accrus par l'implication des acteurs privés : banques, compagnie d'assurances, cabinets de recrutement, qui pourraient par exemple chercher à obtenir ces données à des fins de sélection. Or, si la doctrine juridique porte un intérêt grandissant à l'étude des neurosciences, force est de constater que la problématique de l'ICM est pour l'heure peu traitée.

L'ensemble de ces interrogations concerne directement le secteur de la défense au sein duquel les ICM sont potentiellement appelées à connaître un net essor au cours des prochaines années.

En conclusion, il est recommandé une poursuite de la réflexion au sein du ministère de la Défense, au regard des évolutions des réponses sociétales, éthiques et juridiques, afin d'anticiper et d'orienter la prise de décision sur le développement de ces technologies.

■ BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

ARENAS, Carlos ; « Cyborg iconography. Constructing the image of the cyborg », Oxford, in Riha D, 2003.

BENSAUDE-VINCENT, Bernadette ; « Les vertiges de la technoscience : façonner le monde atome par atome », Paris, La Découverte, 2009.

BERGER, Theodore-W; and al ; « Brain-Computer Interfaces: An International Assessment of Research and Development Trends », New-York, Springer Verlag, 2008.

BESSERVE, Michel ; « Analyse de la dynamique neuronale pour les Interfaces Cerveau-Machines: un retour aux sources », Paris Sud 11, 2007.

BRETON, Philippe ; « A l'image de l'Homme. Du Golem aux créatures virtuelles », Paris, Seuil, 1995.

National Research council of the national academies ; « Emerging cognitive neuroscience and related technologies », Washington D, 2008.

CLARK, Andy ; « Natural-Born Cyborgs : Minds, Technologies, and the Future of Human Intelligence », Oxford, Oxford University Press, 2003.

CLYNES, Manfred ; KLINE, Nathan ; « Drugs, space and cybernetics. Evolution to cyborg », New York, Columbia University Press, 1961.

FORSYTHE, Diana ; « Studying those who study us. An anthropologist in the world of artificial intelligence », Stanford University Press, 2001.

GOUY-PAILLER, Cédric ; « Interfaces Cerveau-Machines », Ed.Universitaires Européennes, 2010.

HABLES, Gray ; « The Cyborg Handbook », New York, Chris (ed.), Routledge, 1995.

KERKHOVE, Derrick ; « Les nerfs de la culture. Etre humain à l'heure des machines à penser », Laval, Presses de l'Université, 1998.

LAURENT, Louis ; « Nanotechnologies : les nanos vont-elles changer notre vie ? 82 questions à Louis Laurent, physicien », Paris, Spécifique éditions, 2007.

LEIBING, Annette ; TOURNAY, Virginie ; « Les technologies de l'espoir – La fabrique d'une histoire à accomplir », Laval, PUL, 2010.

MAESTRUTTI, Marina ; « Imaginaires des nanotechnologies : mythes et fictions de l'infiniment petit », Paris, Vuibert, 2011.

PARIZEAU, Marie-Hélène ; « Biotechnologie, nanotechnologie, écologie », Paris, Quae éditions, 2010.

PAUTRAT, Jean Louis ; « Des puces, des cerveaux et des hommes, quand l'électronique dialogue avec le cerveau », Fayard, 2007.

RIHA, Daniel ; « Cybercultures : Visions of the Human in Science Fiction and Cyberpunk », Inter Disciplinary Press, Oxford, 2008.

Articles

ANDERSON, W French ; « Genetic engineering and our humanness », *Human Gene Therapy*, 1994, pp.755-759.

AYAZ, Hasam ; BUNCE, Scott ; and al ; « Assessment of Cognitive Neural Correlates for a Functional Near Infrared-Based Brain Computer Interface System », *In D. D. Schomorrow (Ed.), Augmented Cognition*, 2009, pp. 699-708.

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme
et implications pour la Défense

BOZZETTO, Roger ; « La science-fiction explore les territoires de la création. Modernité de la hard science-fiction », *IRIS, les Cahiers du Gerf*, 2002, n° 24, pp. 59-65.

CABESTAING, François ; RAKOTOMAMONJY, Alain ; « Introduction aux interfaces cerveau-machine », *colloque GRETSI*, Troyes, 2007.

CERQUI, Daniela ; MULLER, Barbara ; « La fusion de la chair et du métal : entre science-fiction et expérimentations scientifique », *Sociologie et sociétés*, 2010, vol 42, n° 2, pp. 43-65.

TOURNAY, Virginie ; « Quand le vivant devient politique : les avatars de la démocratie technique », *Revue Sociologie et Société*, 2010, n°2, pp. 43-65.

HAGGERTY, Kevin ; ERICSON, Richard ; « The surveillant assemblage », *British Journal of Sociology*, 2000, vol. 51, n°4, pp. 605-622.

HARAWAY, Donna ; « Manifeste cyborg : science, technologie et féminisme socialiste à la fin du XX^e siècle », in BUREAU, Annick ; MAGNAN, Nathalie ; *Connexion (art, réseaux, média)*, Paris, Edition de l'Ensba, 2002.

HELMREICH, Stephan ; « The Spiritual in Artificial Life: Recombining Science and religion in a Computational Culture Medium », *Science as Culture*, 1997, pp. 363-395.

KLUGMAN, Craig ; « From Cyborg Fiction to Medical Reality », *Literature and Medicine*, 2001, pp. 39-54.

LAFONTAINE, Céline ; ROBITAILLE, Michèle ; « Le corps transfiguré des nanotechnologies », in LEIBING, Annette ; TOURNAY, Virginie (dir.) ; *Les technologies de l'espoir – la fabrique d'une histoire à accomplir*, Laval, PUL, 2010, pp. 47-66.

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme et implications pour la Défense

LOTTE, Fabien ; LECUYER, Anatole ; ARNALDI, Bruno ; « Les interfaces cerveau-ordinateur : utilisation en robotique et avancées récentes », *Journées nationales de la recherche en robotique*, Obernai, 2007.

PFURTSCHELLER, Gert ; and al ; The hybrid bci, *Frontiers in Neuroscience*, 2010, vol.4, pp. 1-11.

VAN DAMME, Stéphane ; « De la vie du laboratoire à la théorie du cyborg. Trajectoires de l'anthropologie des sciences aux États-Unis (1979-2007) », *L'Homme*, vol. 3-4, 2008, pp. 393-412.

VIDAL, Jean-Jacques ; « Direct brain computer communication », *Ann Rev. Biophys Bioeng*, 1973, pp. 157-158.

Sites et liens

<http://www.defense.gouv.fr/irsem/publications/laboratoire/laboratoire-de-l-irsem-n-7-2012> : Laboratoire de l'IRSEM n°2 – 2010 : Augmentation des performances humaines avec les nouvelles technologies, Rapport final du groupe de travail IRSEM mai 2010, consulté le 17 novembre 2011.

<http://www.strategie.gouv.fr/content/note-de-veille-n%C2%B0150-septembre-2009-analyse-les-interfaces-cerveau-machine>, note de veille du CAS, septembre 2009, consulté le 17 novembre 2011.

<http://www.strategie.gouv.fr/content/note-de-veille-n%C2%B0128-mars-2009-analyse-impacts-des-neurosciences-quels-enjeux-ethiques-pour->, note de veille du CAS, mars 2009, consulté le 12 septembre 2009.

<http://pirstec.risc.cnrs.fr/ressources/accesfichier/155>, synthèse de l'atelier sur les interfaces cerveau-machine, organisé à Lyon le 6 octobre 2009.

http://storage03.brainsonic.com/customers/la_recherche/20090620/neuroscience/ video de la table ronde "stimuler les capacités du cerveau", Forum sciences et société, Collège de France, 20 juin 2009.

<http://www.inserm.fr/thematiques/technologies-pour-la-sante/dossiers-d-information/interface-cerveau-machine>, site de l'INSERM.

<http://asi.insa-rouen.fr/enseignants/~arakotom/publi/sth-bci.pdf>, article sur les interfaces cerveau-machine pour la palliation du handicap moteur sévère, INSA de Rouen et Université des sciences et technologies de Lille, novembre 2009, consulté le 22 août 2011.

<http://www.senat.fr/compte-rendu-commissions/20110411/opepst.html>, Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques du Sénat, création d'une commission le 12 avril 2011 sur les enjeux des nouvelles technologies pour l'exploration du cerveau, consulté le 15 septembre 2011.

<http://www.cnrs.fr/fr/organisme/ethique/comets/docs/rapportComets091112.pdf>, rapport du comité d'éthique du CNRS (Comets) pour une éthique de la recherche sur les sciences et technologies de l'information, 12 novembre 2009, consulté le 19 septembre 2011.

www.europarl.europa.eu/stoa/publications/studies/stoa2007-13_en.pdf, avis du parlement européen sur l'utilisation des nouvelles

Réflexion sociétale sur les interfaces cerveau-machine pour l'homme et implications pour la Défense

technologies pour augmenter les performances humaines, mai 2009,
consulté le 15 septembre 2011.

Glossaire

BCI : Brain Computeur Interface

CAS : Conseil d'analyse stratégique

CNIL : Commission nationale de l'informatique et des libertés

DARPA : Agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense

EEG : Electro-encéphalographie

ICM : interface cerveau machine

IRM : imagerie par résonance magnétique nucléaire

INRIA : Institut national de recherche en informatique et automatique

IRSEM : Institut de recherche stratégique de l'école militaire

INSERM : Institut national de la santé et de la recherche médicale

RFID : Radio Frequency Identification