

## ANALYSE

### Les interfaces cerveau-machine

*Le terme « interface cerveau-machine » désigne un dispositif permettant à un individu d'agir sur un appareil (un ordinateur, une prothèse ou un robot, par exemple) par l'entremise de ses ondes cérébrales. Déplacer le curseur d'un ordinateur sans toucher la souris ou remplacer un membre amputé par une prothèse que contrôlerait notre cerveau tout en lui renvoyant des informations sensorielles était de l'ordre de la science-fiction il y a quelques années encore. Aujourd'hui, grâce aux avancées théoriques et pratiques des sciences du cerveau, de l'informatique et de la robotique, ainsi qu'aux nouveaux matériaux permettant des implants compatibles avec le système nerveux central, la science-fiction est en passe de devenir réalité. Quelles sont les possibilités et limites des dernières interfaces cerveau-machine ? Ces avancées scientifiques et biomédicales sont-elles uniquement destinées à pallier les conséquences de certains accidents de la vie ou de pathologies sensorimotrices ? Entre réalité et fantasmes, les attentes sont aussi pressantes que les questions éthiques soulevées par ce type de développement.*

Les interfaces homme-machine constituent un champ de recherche et de développement pluridisciplinaire où convergent la neurobiologie, les neurosciences computationnelles, l'informatique, les facteurs humains, l'ergonomie, la robotique ou encore la psychologie cognitive. Parler d'interactions entre un être humain et une machine – que cette dernière soit un ordinateur, un jeu vidéo, un robot, ou encore une prothèse, pour ne citer que quelques-uns des exemples les plus connus – implique **un échange bidirectionnel d'informations entre un individu et cette machine.**

Pour la contrôler, il faut que l'être humain puisse lui transmettre une commande à exécuter et faire en sorte que cet ordre envoyé et transmis soit transformé en action<sup>1</sup>. Toutefois, afin de produire un comportement adaptatif<sup>2</sup>, **envoyer une commande ne suffit pas. Un retour** (on parle aussi de **rétroaction** ou de **feedback**) de la part de la machine est nécessaire afin d'ajuster l'action en temps réel<sup>3</sup>.

Afin que ce couplage perception-action<sup>4</sup> ait lieu, et soit le plus efficace possible, chaque voie de transmission entre l'humain et la machine peut utiliser des techniques et des dispositifs très différents pour optimiser l'échange d'information. Au minimum, un canal est nécessaire pour l'envoi d'information (*output*) de l'utilisateur vers l'appareil et un autre pour la rétroaction (*input*) qui suit le chemin inverse. Une fois ces canaux mis en place, il faut aussi **trouver un, voire plusieurs, codes ou langages afin que la machine et l'homme puissent se comprendre et donc communiquer en décodant les informations qu'ils s'envoient réciproquement.** Cette partie nécessite donc de pouvoir décoder les signaux émis par les voies efférentes du système nerveux (c'est-à-dire les voies qui permettent à l'information d'aller du cerveau vers la périphérie) tout en codant en « langage » neuronal les sensations prélevées par la machine et envoyées en retour.

<sup>1</sup> Comme nous le verrons par la suite, la réalité du processus nécessaire à l'exécution par une machine d'une commande souhaitée par un humain est autrement plus complexe que ne le laisse entendre notre présentation initiale.

<sup>2</sup> C'est-à-dire un comportement qui puisse s'accommoder des contraintes dynamiques de l'environnement physique et social.

<sup>3</sup> Pour ce faire, il est nécessaire, eu égard aux délais inhérents à la communication entre l'homme et l'appareillage, de mettre dans le système homme-machine une partie algorithmique permettant de calculer de manière prospective, c'est-à-dire d'anticiper le comportement à venir.

<sup>4</sup> Nous pouvons ici voir l'illustration en termes technologiques de ce que James J. Gibson, père de la psychologie écologique, appelle le **couplage perception-action**. Écologique est à prendre au sens « réaliste » du terme et non protection de l'environnement bien que les deux sens ne soient pas incompatibles. L'approche écologique de la perception et de l'action n'étudie pas le sujet humain mais un système acteur-environnement et les échanges informationnels qui participent à l'émergence de son comportement. Cf. Gibson J. J. (1979), *The Ecological Approach to Visual Perception*, Houghton Mifflin, Boston.

Notre quotidien abonde en dispositifs permettant à l'homme d'envoyer de l'information à une machine. La télécommande d'un poste de télévision, l'interrupteur d'une machine à laver ou le volant d'une voiture sont parmi les plus courants. C'est aussi le cas du clavier et de la souris qui nous servent à échanger avec un ordinateur. Ce dernier nous renvoie généralement de l'information via un écran et des enceintes. Nous pouvons aussi prendre l'exemple des téléphones mobiles nouvelle génération dits « tactiles ». L'écran y est un des points d'échange d'information bidirectionnel nécessaire à l'interaction homme-machine. Nous communiquons avec le système d'exploitation du téléphone par des pressions mécaniques sur cet écran qui, en retour (sensoriel) visuel et haptique, renvoie une vibration pour nous informer que notre action a été détectée. Enfin, dernier exemple d'interface homme-machine relativement courante, les systèmes de **commande vocale** dont sont équipés certains téléphones ou qui permettent de dicter un texte à un ordinateur voire de contrôler certaines de ses applications.

**Figure 1 :** « Turning thoughts into action » (Transformer la pensée en action). Titre de la couverture du magazine *Nature* (édition du 13 juillet 2006). Source : Nature Publishing Group®



Au-delà de ces exemples habituels, il existe aujourd'hui de nouveaux types d'interfaces. Leur but est de permettre **un contrôle de la machine sans passer par une action motrice exécutée** – comme la pression d'une touche ou le déplacement d'une souris. On parle alors d'**interfaces cerveau-machine** (*brain-computer interfaces*, ou BCI, en anglais) puisqu'elles fonctionnent grâce à un échange d'information entre un dispositif de mesure ou d'estimation de l'activité cérébrale d'un individu (implanté ou non) et la machine à commander. À première vue, ces interfaces répondent au fantasme du « contrôle par la pensée » d'un ordinateur, voire d'un robot. Mais, le terme « pensée », bien que très souvent repris par les médias (y compris les journaux scientifiques) est un abus de langage (*Fig. 1*). Dans un tel contexte, pensée renvoie **en fait au décodage, au calcul, et surtout à l'interprétation de l'activité cérébrale de l'utilisateur qui est réalisée par un ordinateur ou un processeur** à l'aide d'un ou plusieurs algorithmes. Ces interfaces ne sont donc pas contrôlées par la pensée en tant que telle, mais par des ondes cérébrales qui, après avoir été enregistrées, converties, traitées et

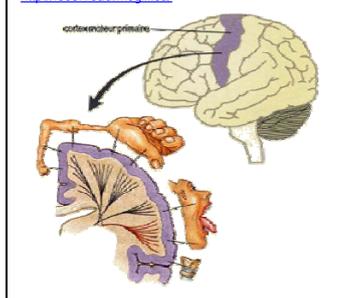
analysées vont permettre à l'utilisateur de déplacer un curseur voire une prothèse. Il faut garder à l'esprit qu'arriver à de tels résultats requiert un entraînement colossal pour une précision qui reste assez grossière. Mais, il y a quelques années encore, de telles prouesses biotechnologiques n'étaient pas réalisables. Aujourd'hui, elles offrent de formidables perspectives en termes de réhabilitation fonctionnelle.

### Quelques exemples d'interfaces cerveau-machine chez les animaux

Pour en venir aux interfaces cerveau-machine à proprement parler, une voie qui s'est rapidement développée est celle de l'implantation de micro-électrodes dans le cerveau afin d'enregistrer l'information neuronale mais aussi de stimuler les neurones en retour. Dans cette perspective, comme pour toutes les expérimentations qui comportent un risque pour l'humain, c'est sur des animaux que les premiers essais d'interfaces cerveau-ordinateur invasives ont eu lieu. Par invasif, nous entendons avec insertion d'un (ou plusieurs) corps étranger(s) dans le cerveau de l'animal. Les travaux menés par Eberhard Fetz dès la fin des années 1960 sur l'enregistrement unitaire de cellules permirent de montrer que des singes peuvent contrôler de manière volontaire l'activité de neurones corticaux si on leur fournit une rétroaction biologique (*biofeedback*) les informant du niveau d'activité neuronale.

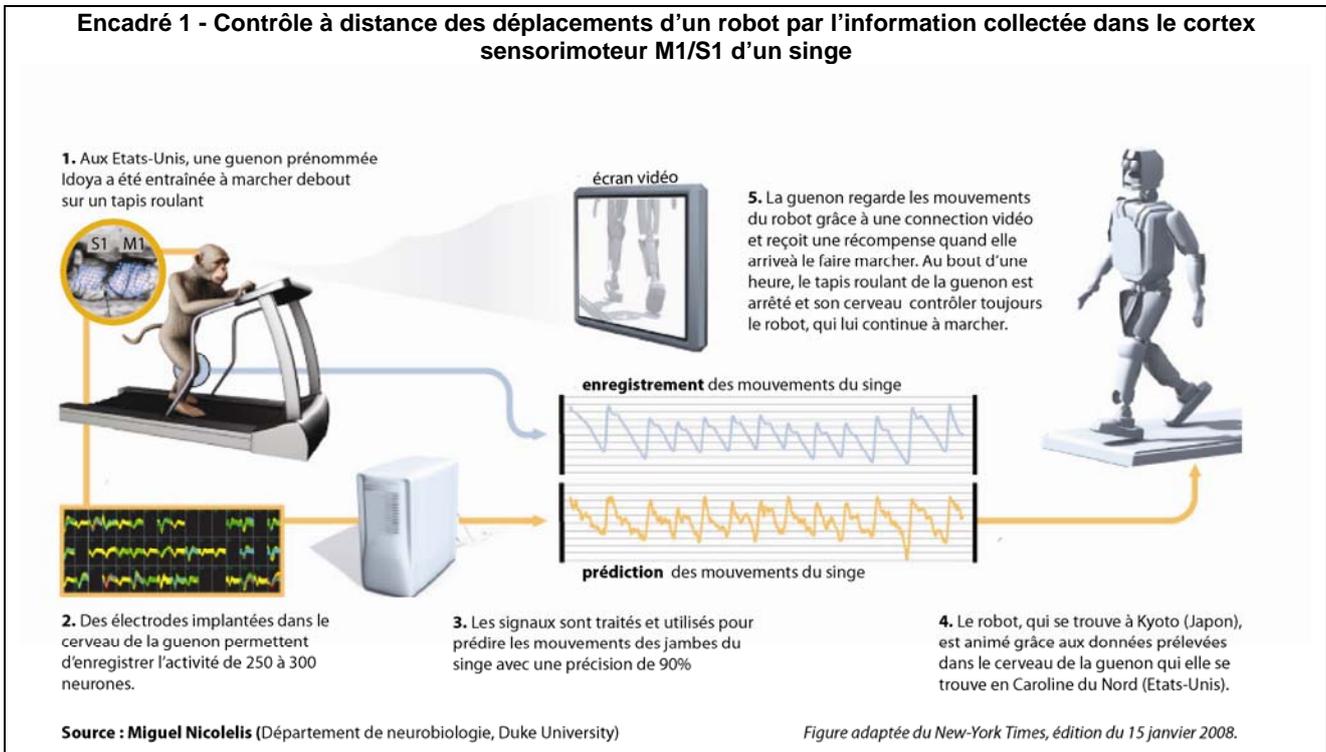
Malgré un nombre important de travaux sur le sujet, ce n'est que dans les années 1990 que des progrès significatifs dans ce domaine ont été réalisés, notamment grâce aux efforts de Miguel Nicolelis<sup>5</sup> neurologue à la Duke University aux États-Unis. Ces travaux, longtemps financés par la DARPA, se sont principalement intéressés au cortex moteur primaire, une partie du cerveau qui participe à l'exécution et au contrôle du mouvement volontaire (*Fig. 2*). Nicolelis et son équipe ont tout d'abord travaillé sur le rat. Ils ont appris au rongeur à commander un levier par l'intermédiaire d'électrodes implantées dans son cerveau. Tout d'abord, le rat a été entraîné à presser physiquement le levier afin de gagner une récompense : la possibilité de boire de l'eau. Pendant que le rat pressait, Nicolelis et son équipe ont enregistré l'activité de 46 neurones de son cortex moteur grâce à des micro-électrodes. Les chercheurs ont ensuite supprimé la possibilité pour le rat de boire en actionnant le levier, frustrant par là-même le rongeur. Ce dernier a pressé le

**Figure 2 :** Le cortex moteur primaire (M1) et l'homoncule de Penfield illustrant les représentations de divers membres sur ce cortex. Source : *Le cerveau à tous les niveaux* © <http://lecerveau.mcgill.ca/>

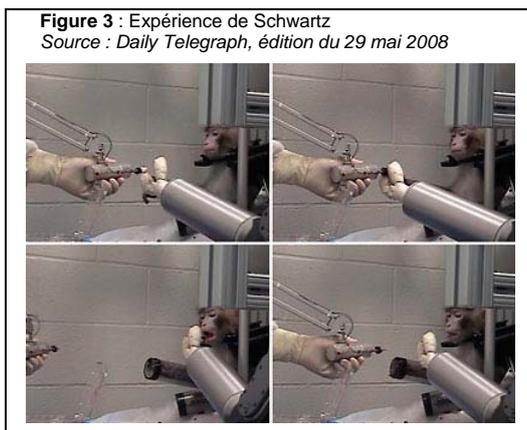


<sup>5</sup> <http://www.nicolelislab.net>

levier à plusieurs reprises, mais n'a reçu de l'eau qu'au moment où les 46 neurones de son cortex moteur déchargeaient de manière comparable à celle enregistrée auparavant. Après quelques heures, le rat a appris à gagner l'eau par la seule action de son cerveau, sans avoir à exécuter de mouvement<sup>6</sup>.



C'est avec des singes que, depuis la fin des années 1990, Nicolelis et son équipe poursuivent leurs travaux. La neuroanatomie du cortex moteur primaire des primates est assez proche de celle de l'homme. Les chercheurs ont ainsi pu identifier comment les neurones de cette partie du cerveau déchargent en fonction de la direction, de la vitesse et de la force des mouvements produits. Après avoir placé plus de 700 électrodes dans 10 régions du cortex primaire moteur d'un singe, et donc enregistré 300 neurones, ils ont réussi à lui apprendre à déplacer un bras robotisé dans trois dimensions en utilisant uniquement les signaux électriques de son cerveau<sup>7</sup>. Dans une autre expérience, cette équipe a réussi à faire en sorte qu'un singe, par sa seule activité corticale, fasse marcher un robot sur un tapis roulant (*Encadré 1*).



Récemment, une nouvelle étape a été franchie par l'équipe d'Andrew Schwartz, professeur de neurobiologie à la faculté de médecine de l'université de Pittsburgh. Schwartz, autre figure de proue de la recherche sur les interfaces cerveau-machine, a réussi avec son équipe à faire en sorte qu'un singe se nourrisse à l'aide d'une prothèse robotisée de bras qu'il commandait uniquement par l'activité électrique transmise (et reçue) par des électrodes implantées dans son cerveau<sup>8</sup>. Cette expérience constitue une première dans la mesure où l'interface ferme la boucle sensorimotrice et permet le retour d'information nécessaire à la réalisation d'une tâche de coordination complexe de préhension (*Fig. 3*).

Enfin, l'un des résultats les plus prometteurs à l'heure actuelle a été publié en décembre 2008 par l'équipe d'Eberhard Fetz de l'université de Washington. Ces chercheurs ont réussi à faire en sorte qu'un singe puisse bouger un membre qui était paralysé grâce à des connexions artificielles implantées entre les cellules

<sup>6</sup> Abbott A. (2006), « Neuroprosthetics: in search of the sixth sense », *Nature*, 442(7099), 125-127.

<sup>7</sup> Wessberg J., Stambaugh C. R., Kralik J. D., Beck P. D., Laubach M., Chapin J. K., Kim J., Biggs S. J., Srinivasan M. A., and Nicolelis M. A. (2000), « Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates », *Nature*, 408(6810), 361-365.

Nicolelis M. A. L. (1999), *Methods for neural ensemble recordings*, CRC Press, Boca Raton.

<sup>8</sup> Velliste M., Perel S., Spalding M. C., Whitford A. S., and Schwartz A. B. (2008), « Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding », *Nature*, 453(7198), 1098-1101.

corticales et les muscles des membres atteints. Ces connections artificielles ont donc, grâce aux propriétés de plasticité du cerveau, pris le relais de circuits neurophysiologiques déficients pour permettre au singe de se mouvoir à nouveau<sup>9</sup>. Dans ce cas, nul besoin de membre robotisé ou de prothèse pour pallier le déficit.

Bien que non exhaustif, le rapide survol que nous venons de proposer montre clairement que l'ensemble des résultats obtenus sur les singes offre l'espoir d'utiliser des interfaces cerveau-machine pour remplacer des membres amputés et/ou permettre à des personnes handicapées motrices de se déplacer en contrôlant un exosquelette (*Encadré 1*) et peut-être en redonnant une certaine mobilité à un membre paralysé. Mais pour ce faire, il faut avant toute chose pouvoir transférer sur l'être humain la technologie développée dans le cadre d'expérimentations animales.

## Interfaces cerveau-machine chez l'homme

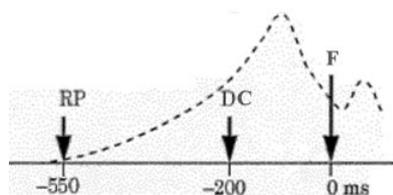
Chez l'homme, l'histoire des interfaces cerveau-machine remonte à la **découverte de l'activité électrique du cerveau par Hans Berger**. En 1924, Berger est en effet le premier à avoir enregistré un électro-encéphalogramme (EEG) sur un cerveau humain. Pour y arriver, il a inséré des fils argentés sous le cuir chevelu de ses patients. Ces fils étaient connectés à un électromètre et, tout d'abord, ne lui permirent pas d'obtenir des données exploitables. C'est à l'aide d'un galvanomètre lui procurant une sensibilité de 1/10 000<sup>e</sup> de volts qu'il réussit, après un travail de longue haleine, à obtenir les premiers enregistrements de l'activité électrique du cerveau. Il découvre ainsi une onde cérébrale (alpha, 9-12 Hz) qui porte son nom.

Il a cependant fallu attendre 1980 pour qu'Edward Schmidt propose pour la première fois d'utiliser l'activité neurale corticale comme source de commande volontaire afin de contrôler une prothèse qui aiderait les patients souffrant de paralysie à retrouver une partie de leur mobilité. Mais, à cette époque, la recherche était loin de pouvoir réaliser la vision de Schmidt, bien que celle-ci soit sous-tendue par une intuition juste qui sera vérifiée des années plus tard grâce à l'imagerie cérébrale fonctionnelle.

L'imagination d'un mouvement sollicite dans la plupart des cas des réseaux d'activité cérébrale très proches de ceux mis en jeu pour exécuter ce même mouvement<sup>10</sup>. Ainsi, si l'on demande à une personne d'imaginer deux modes de coordination sensorimotrice complexes : (1) les différences d'activité cérébrale observées lors de l'exécution de ces deux tâches motrices persistent lorsque les deux tâches sont imaginées et (2) il est alors possible, grâce à l'imagerie cérébrale fonctionnelle, de distinguer lequel de ces deux patrons de coordination la personne est en train d'envisager<sup>11</sup>.

### Encadré 2 – Activité cérébrale pré-consciente

**Figure 4** : Activité cérébrale précédant la décision de déclencher un mouvement. Source : *Le cerveau à tous les niveaux* © <http://lecerveau.mcgill.ca/>



Les travaux de Benjamin Libet<sup>12</sup> sur la décision de déclencher un mouvement sont d'un intérêt tout particulier dans le champ des interfaces cerveau-machine. Grâce à un dispositif expérimental astucieux, Libet a mis en évidence l'existence d'une forme d'activité cérébrale qui précéderait la prise de conscience d'un individu lorsque ce dernier s'apprête à déclencher une action. Il a montré que le cerveau entre en action quelque 350 millisecondes (RP) avant que la prise de conscience de bouger (DC) n'ait lieu. Une prise de conscience qui elle-même précède l'initiation du mouvement (F) de 200 millisecondes<sup>13</sup>.

Ce type de résultats est à situer dans le cadre d'une série de travaux, notamment ceux de John Dylan Haynes, qui décodent l'activité du cerveau grâce à l'imagerie cérébrale fonctionnelle<sup>14</sup>. **Il est aujourd'hui possible de savoir, grâce à la neuroimagerie, si une personne est en train de faire une addition ou une soustraction, de regarder une ligne oblique ou horizontale, ou encore de savoir quel type d'images**

<sup>9</sup> Moritz C. T., Perlmutter S. I., and Fetz E. E. (2008), « Direct control of paralysed muscles by cortical neurons », *Nature*, 456(7222), 639-642.

<sup>10</sup> Jeannerod M. (1995), « Mental imagery in the motor context », *Neuropsychologia*, 33(11), 1419-1432.

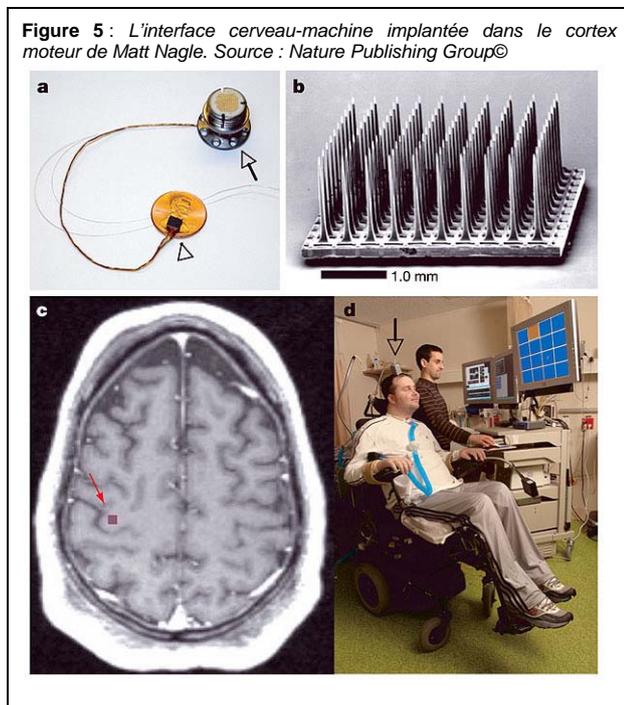
<sup>11</sup> Oullier O., Jantzen K. J., Steinberg F. L., and Kelso J. A. S. (2005), « Neural substrates of real and imagined sensorimotor coordination », *Cerebral Cortex*, 15(7), 975-985.

<sup>12</sup> Libet B. (1985), « Unconscious Cerebral Initiative and the Role of Conscious Will in Voluntary Action », *The Behavioral and Brain Sciences*, VIII, 529-539 ; Libet B., Gleason C. A., Wright E. W. und Pearl D. K. (1983), « Time of Conscious Intention to Act in Relation to Onset of Cerebral Activities (Readiness-Potential): The Unconscious Initiation of a Freely Voluntary Act », *Brain*, 106, 623-642.

<sup>13</sup> Les travaux de Libet s'inscrivent donc dans le prolongement des recherches antérieures de Lüder Deecke et Hans Helmut Kornhuber qui, dans les années 1960, ont travaillé sur une composante précoce du potentiel de préparation motrice aussi appelée *Bereitschaftspotential*. Voir Kornhuber H.H. et Deecke L. (1990), « Readiness for movement – The Bereitschaftspotential-Story », *Current Contents Life Sciences* 33, 4 Citation Classics January 22: 14.

<sup>14</sup> La littérature anglo-saxonne spécialisée ou grand public qualifie abusivement ce type de recherches de lecture mentale (*mind reading*).

elle est en train de visionner<sup>15</sup>. Certes, pour arriver à de tels résultats, il convient d'avoir enregistré au préalable l'activité cérébrale des individus en train d'effectuer les tâches en question. Mais en 2008, pour la première fois, une équipe a été capable de **deviner quel type d'images un sujet était en train de regarder alors que ce même sujet n'avait jamais vu l'image concernée**<sup>16</sup>. Quant à la production de mouvement qui reste le but des neuroprothèses, le cerveau fournit plusieurs types d'informations **dont le sujet a ou non conscience (Encadré 2)**<sup>17</sup>.



Une des manifestations les plus probantes a été révélée au grand public en 2006 à travers le cas d'un patient tétraplégique devenu célèbre dans le monde entier : Matt Nagle (Fig. 1d). Une équipe de chercheurs menée par John Donoghue de la Brown University a implanté 96 électrodes dans son cortex moteur (Fig. 1c) afin d'envoyer des informations à son cerveau et d'en recevoir. Le patient a ensuite entrepris un long et difficile travail d'entraînement afin de pouvoir utiliser cette interface appelée *BrainGate* (développée et produite par une société privée) dans plusieurs types de tâches. La première a été de déplacer un curseur sur un écran afin de poursuivre une cible mobile. Cette cible se déplaçait ou s'arrêtait et le patient devait faire en sorte que le curseur soit maintenu plus de 500 ms au-dessus d'elle pour qu'un point lui soit accordé. La deuxième tâche sur laquelle Nagle a travaillé était une simulation d'ouverture d'e-mail. Le patient devait ouvrir un e-mail et le lire pour montrer qu'il pouvait exécuter deux tâches simultanées. La troisième tâche était l'utilisation d'une télécommande (simulée sur l'écran d'un ordinateur) qui permettait de changer les chaînes et d'allumer une télévision.

La quatrième était un jeu vidéo célèbre : Pong, l'ancêtre des jeux vidéo de tennis. Matt Nagle a fini par maîtriser le jeu et réussi à renvoyer la balle. La cinquième tâche ressemblait à la première : il devait intercepter des cibles avec une difficulté supplémentaire, puisqu'il devait éviter certains obstacles sur l'écran. La sixième tâche consistait à actionner une main prothétique. En déplaçant le curseur sur le haut, Nagle ouvrait la main ou la fermait par un mouvement contraire. Au fur et à mesure de son entraînement, le patient a arrêté de regarder l'écran sur lequel se trouvait le curseur pour se concentrer sur la prothèse. Enfin, la dernière tâche, la plus difficile, consistait à déplacer un objet en contrôlant un bras robotisé<sup>18</sup>. Cette recherche<sup>19</sup> ouvre de nouveaux horizons pour les personnes handicapées, mais pas uniquement. Comme le relate Jonathan D. Moreno, directeur du centre de bioéthique médicale de l'université de Virginie dans son ouvrage *Mind Wars*<sup>20</sup>, les travaux sur les neuroprothèses intéressent au plus haut point l'armée américaine<sup>21</sup>. La possibilité d'un exosquelette de type « Robocop »<sup>22</sup> ou « Dr. Octopus »<sup>23</sup> qui serait directement relié au cerveau ou à la moelle épinière des soldats et de fait leur permettrait d'être plus puissants et résistants, est prise très au sérieux. Ceci conduit à se pencher sur les questions médicales et éthiques que les recherches sur les interfaces cerveau-machine soulèvent.

<sup>15</sup> Haynes J. D. (2009), « Decoding visual consciousness from human brain signals », *Trends Cogn Sci.*, 13(5), 194-202. Haynes J. D., and Rees G. (2006), « Decoding mental states from brain activity in humans », *Nat. Rev. Neurosci.*, 7(7), 523-534. Bles M., and Haynes J. D. (2008), « Detecting concealed information using brain-imaging technology », *Neurocase*, 14(1), 82-92.

<sup>16</sup> Kay K. N., Naselaris, T. Prenger, R. J. and Gallant J. L. (2008), « Identifying natural images from human brain activity », *Nature*, 452(7185), 352-355.

<sup>17</sup> Bode S. and Haynes J. D. (2009). « Decoding sequential stages of task preparation in the human brain », *Neuroimage*, 45(2), 606-613.

<sup>18</sup> Pour voir Matt Nagle en train de réaliser les tâches décrites et écouter John Donoghue parler de ses travaux : <http://www.youtube.com/watch?v=TJJpBpHoPW0&feature=fvw> (en anglais). Cf. aussi L. R. Hochberg, M. D. Serruya, G. M. Friehs, J. A. Mukand, M. Saleh, A. H. Caplan, A. Branner, D. Chen, R. D. Penn, and J. P. Donoghue, (2006), « Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia », *Nature* 442 (7099):164-171.

<sup>19</sup> Financée par une compagnie privée dans laquelle certains des chercheurs sont parties prenantes : <http://www.braingate.com/>

<sup>20</sup> Moreno J. D. (2006), *Mind Wars: Brain Research and National Defense*, Dana Press, New York.

<sup>21</sup> Un long entretien de Jonathan Moreno sur le sujet : <http://www.youtube.com/watch?v=t8bPCZDJQYk> (en anglais)

<sup>22</sup> En référence au film réalisé en 1987 par Paul Verhoeven dans lequel un policier est « reconstruit » et « amélioré ».

<sup>23</sup> En référence au personnage de la bande dessinée *Spiderman* qui commande par la pensée des tentacules mécaniques.

Dans une large mesure, les interfaces cerveau-machine ne posent pas de problèmes plus spécifiques que ceux d'autres innovations scientifiques. Leur caractère invasif, toutefois, présente des facteurs de risques à mesurer dans une stricte approche coûts/bénéfices acceptée par le patient ou en cas d'incapacité par des tiers de confiance.

Il reste aujourd'hui difficile d'évaluer avec précision les risques liés aux interfaces cerveau-machine<sup>24</sup>. En effet, ces risques existent à différents niveaux, en particulier – et d'un point de vue biomédical –, au niveau de l'implant lui-même qui a des chances non négligeables d'être rejeté. Dans le cadre d'une audition parlementaire de la Mission d'information sur la révision des lois de bioéthique<sup>25</sup>, le professeur François Berger, directeur de l'unité de nanomédecine à l'Institut des Neurosciences de Grenoble, a signalé le taux élevé de rejets observé pour certains implants. Il a toutefois mentionné l'apparition de nanotubes de carbone qui depuis plus de deux ans permettaient de diminuer le nombre de rejets.

L'aptitude de ces interfaces à restaurer, donc modifier, certaines fonctions (raisonnement, mémoire, désirs, volontés), implique qu'elles soient encadrées, dans leur contexte respectif, de manière à éviter des manipulations ou des instrumentations des agents, dont sont aussi capables des approches psychologiques (conditionnement, endoctrinement) ou chimiques (drogues, médicaments psychotropes).

Aux États-Unis, l'autorisation des appareils médicaux est délivrée par la Food and Drug Administration (FDA) après qu'un comité local (IRB) a approuvé la recherche. Au Canada, c'est le Bureau médical de Health Canada qui est en charge. En France, une expérimentation de ce type doit d'abord recevoir l'approbation d'un comité d'expert de l'institution qui sera la promotrice de la recherche. Ensuite, le projet de recherche devra recevoir un avis favorable d'un comité de protection de la personne (CPP) et de l'Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé.

Enfin, si le bien de l'individu est toujours principalement recherché, la question posée par toutes ces méthodes concernera la difficile distinction entre restauration ou maintien des capacités « normales » et amélioration des potentialités, d'autant plus que cette dernière serait obtenue ici sans cet effort personnel qui permet ordinairement de tracer la limite entre perfectionnement, naturel et louable, et transformation, quasi-diablesque, de l'humain en « être bionique ».

Mais cette dernière opposition, quasi-métaphysique, pour séduisante qu'elle soit, ne doit pas faire oublier que les avancées scientifiques ne sont pas uniquement faites de sauts et de ruptures comme les évolutions sociales. La convergence NBIC, dont les interfaces cerveau-machine sont le symbole, sera progressive et permettra la résolution au fil de l'eau de certains dilemmes apparents, surtout si cette amélioration, par des voies diverses, des capacités humaines s'effectue de manière collective et partagée. En dernière analyse, comme signalé précédemment, cette grande convergence a déjà commencé, bien avant les prothèses neurales, les nano-vecteurs ou les stimulations magnétiques intracrâniennes, avec le développement des ordinateurs et des dispositifs de l'intelligence artificielle, hors desquels aujourd'hui l'intelligence, la mémoire, la décision, les capacités professionnelles et même sociales des individus peuvent difficilement être envisagées.

> *Olivier Oullier, conseiller scientifique<sup>26</sup> au Département Questions Sociales  
et Pierre-Henry Suet, chargé de mission au  
Département Recherche, Technologies, Développement durable*

<sup>24</sup> Vidéo de la table ronde « Stimuler les capacités du cerveau : jusqu'où aller ? », Forum Sciences et Société, Collège de France, 20 juin 2009 : [http://storage03.brainsonic.com/customers/la\\_recherche/20090620/neuroscience/](http://storage03.brainsonic.com/customers/la_recherche/20090620/neuroscience/)

<sup>25</sup> Pour voir la vidéo de l'audition du professeur Berger : <http://www.assemblee-nationale.fr/13/commissions/bioethique/bioethique-20090922-2.asp>

<sup>26</sup> Maître de conférences en neurosciences (UMR 6146, université de Provence) et chercheur associé au Center for Complex Systems and Brain Sciences, Florida Atlantic University.

## BRÈVES

### > UNE BAISSÉ DES ÉMISSIONS MONDIALES DE CO<sub>2</sub> EN 2009

---

La **crise économique** aurait eu un **impact positif sur les émissions mondiales de CO<sub>2</sub>**, qui auraient enregistré leur plus forte baisse en près de 40 ans (- 2,6 %, soit davantage qu'en 1981, après la crise pétrolière) en raison du ralentissement des activités industrielles et commerciales dans le monde et du report de la construction de centrales à charbon. C'est du moins, selon le *Financial Times* du 21 septembre, l'une des conclusions tirées du « **World Energy Outlook 2009** » que l'**Agence internationale de l'Énergie (AIE)** présentera le 6 octobre prochain, lors de la 3<sup>e</sup> réunion de la **Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC)**. Un quart de cette baisse serait également imputable aux mesures gouvernementales de régulation, notamment trois d'entre elles, selon l'AIE : l'**objectif de l'Europe de réduire ses émissions de 20 % d'ici à 2020**, les **normes automobiles anti-pollution adoptées aux États-Unis** et les **politiques d'efficacité énergétique de la Chine**. Ces estimations de l'AIE s'appuient sur plusieurs prévisions, notamment celles du Département américain de l'Énergie (DOE) selon lequel les émissions des États-Unis baisseraient de 6 % en 2009, après avoir déjà diminué de 3,8 % l'année précédente. Mais avec la reprise économique attendue en 2010, les émissions américaines pourraient redémarrer à la hausse – estimée à 0,7 % l'an prochain – selon le DOE. Il existe donc une « fenêtre d'opportunités », certes étroite, pour renforcer les actions de lutte contre le changement climatique.

[http://www.ft.com/cms/s/0/a0f0331c-a611-11de-8c92-](http://www.ft.com/cms/s/0/a0f0331c-a611-11de-8c92-00144feabdc0.html?catid=6&SID=google&nclck_check=1)

[00144feabdc0.html?catid=6&SID=google&nclck\\_check=1](http://www.ft.com/cms/s/0/a0f0331c-a611-11de-8c92-00144feabdc0.html?catid=6&SID=google&nclck_check=1) ;

<http://www.worldenergyoutlook.org/> ;

<http://www.energy.gov/>

> **N. B.**

### > LA CROISSANCE VERTE, UN ARGUMENT EN FAVEUR D'UNE COOPÉRATION CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

---

L'étude réalisée par les économistes de Cambridge, à l'instigation de l'ONG *Climate Group*, réfute l'idée selon laquelle l'effort de transition énergétique induirait un ralentissement économique. À contre-courant des estimations du coût des mesures d'atténuation, évalué par le rapport Stern à 1 % du PIB mondial d'ici à 2050, elle montre qu'un **objectif d'atténuation mondial traduit par une fiscalité carbone – dont les recettes seraient efficacement redistribuées – et couplé à des normes complémentaires d'efficacité énergétique, permettrait de créer 20 millions de nouveaux emplois. Dans une moindre mesure, la croissance mondiale serait stimulée à hauteur de + 0,8 % d'ici à 2020.** À deux mois et demi de la Conférence de Copenhague et à quelques jours du G20 de Pittsburgh, où l'UE proposera aux pays développés de transférer 7 milliards d'euros aux PED entre 2012 et 2020, la remise de ce rapport à Ban Ki-Moon lors du sommet onusien sur le climat n'est pas anodine: **elle vise essentiellement à relancer les négociations climatiques.** Le réalisme du modèle utilisé, dont les conclusions reposent sur un « **double dividende** » économique et écologique qui fait encore l'objet de débats, est en effet critiquable : il retient notamment comme hypothèses l'engagement unilatéral de l'Europe ou des États-Unis à des réductions de 30 % de leurs émissions d'ici à 2020 (base 1990), correspondant à la cible proposée par l'UE uniquement en cas d'accord mondial, et qui restent loin de l'objectif du retour aux niveaux de 1990 envisagé aux États-Unis. Le message de l'ONG parrainée par Tony Blair est avant tout politique : **il plaide pour une collaboration entre pays développés et émergents contre le changement climatique dès décembre prochain.** Le prix de la tonne carbone diminuerait ainsi dès lors qu'un nombre critique de pays participe à l'atténuation des émissions de GES : de 65 dollars en 2020 si l'Europe est seule à agir, il serait divisé par 5 à cet horizon si la Chine adoptait un objectif de retour aux niveaux d'émissions de 2010, et par 15 si l'effort était mondial.

Rapport 'Cutting the Cost: The Economic Benefits of Collaborative Climate Action':  
[http://www.theclimategroup.org/assets/resources/Cutting\\_the\\_Cost\\_-\\_BTCD\\_Report.pdf](http://www.theclimategroup.org/assets/resources/Cutting_the_Cost_-_BTCD_Report.pdf)

> **B. B. & M. B. J.**

**> MIEUX LÉGIFÉRER : JOSÉ M. BARROSO REPREND L'INITIATIVE**

Début septembre, José M. Barroso, alors candidat à sa propre succession à la tête de la Commission européenne, a fait une place dans ses « *political guidelines* » présentées aux députés européens au concept de « *smart regulation* » renvoyant à celui de « *better regulation* ». Reconduit le 16 septembre à une large majorité par le Parlement européen, J. M. Barroso a été plus explicite le 18 à l'occasion de la présentation par le Groupe de haut niveau sur les charges administratives de son second rapport à la Commission. Il a en effet annoncé que les **services de la Commission européenne dédiés à l'approche « Mieux légiférer » agiront désormais sous son autorité directe**, et non plus sous celle du Commissaire européen chargé de l'Industrie et de l'Entreprise. Il réaffirme ainsi son attachement à une approche intégrée dans la Stratégie de Lisbonne et destinée à exploiter tous les avantages du marché intérieur, à stimuler la croissance et la création d'emplois et à mettre fin à toutes les tracasseries administratives dont souffrent notamment les PME européennes. Il établit ainsi **une continuité forte entre les Commissions Barroso I et Barroso II**. Enfin, J. M. Barroso entend également **s'emparer directement de ce qui concerne les études d'impact et les études d'évaluation *ex-post***, au nom d'une approche « non idéologique » de la régulation.

[http://ec.europa.eu/commission\\_barroso/president/pdf/press\\_20090903\\_EN.pdf](http://ec.europa.eu/commission_barroso/president/pdf/press_20090903_EN.pdf)

<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=SPEECH/09/400&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en>

> *M.-C. M.*

Rédacteurs des brèves : Blandine Barreau (DRTDD), Nathalie Bassaler (VPI), Mahdi Ben Jelloul (DAEF), Marie-Cécile Milliat (DIS)

Directeur de la publication :  
René Sève, directeur général

Rédactrice en chef de la Note de veille :  
Nathalie Bassaler, chef du Service Veille,  
Prospective, International

Pour consulter les archives  
de la Note de Veille  
en version électronique :  
[http://www.strategie.gouv.fr/  
rubrique.php3?id\\_rubrique=12](http://www.strategie.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=12)

Centre d'analyse stratégique  
18, rue de Martignac  
75700 Paris cedex 07  
Téléphone 01 42 75 61 00  
Site Internet :  
[www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)

