

# Restaurer et améliorer grâce aux neurotechnologies : aspects éthiques

## DOSSIER THÉMATIQUE

## Introduction générale

Les **neurotechnologies\*** sont les dispositifs qui permettent de mesurer, d'analyser et de moduler les activités cérébrales. Les activités cérébrales sont le support de l'activité mentale et du comportement de la personne humaine. Elles sont analysées par l'intermédiaire de **données neurales\*** recueillies selon diverses modalités brièvement décrites dans le paragraphe suivant. Les **dispositifs d'interface cerveau-machine\*** (ICM) peuvent également être utilisés pour moduler les activités cérébrales et donc intervenir sur les activités motrices, sensorielles, mentales et comportementales de la personne qui peut en être plus ou moins consciente. Leur utilisation s'est développée de manière importante avec les progrès technologiques et l'introduction de **l'intelligence artificielle\*** dans le traitement des données.

Dans le domaine médical, les neurotechnologies sont utilisées :

- dans le traitement de certaines maladies neurologiques ou psychiatriques (maladie de Parkinson, mouvements anormaux, troubles obsessionnels compulsifs -TOC-, dépression...).
- dans la réhabilitation de déficiences motrices ou sensorielles, ou de troubles du langage grâce à des **neuroprothèses\***.

Hors domaine médical, on assiste à un essor des interfaces cerveau-machine non invasives destinées à « améliorer » le bien-être, gérer le stress, améliorer les performances d'attention voire les performances cognitives. Cette large utilisation à des fins commerciales peut avoir des impacts aux conséquences incertaines dans les domaines éducatifs, professionnels, sportifs, militaires et plus globalement sociétaux si ces dispositifs venaient à être utilisés dans la surveillance ou l'incitation comportementale.

Après avoir rappelé la typologie des dispositifs existants, **ce dossier aborde les tensions éthiques que leur utilisation soulève en insistant sur les conséquences de leur éventuelle prolifération dans la société, largement méconnues et qui justifient une prise de conscience de chaque citoyen.**

## Les dispositifs utilisés

Il faut distinguer :

- Les dispositifs de détection de l'activité cérébrale sous forme de **données neurales\*** qui sont analysées par des systèmes informatiques qui vont générer des réponses (activation d'une prothèse par exemple) ;
- Les dispositifs de modulation de l'activité cérébrale\*, électrique ou magnétique.

Ces dispositifs, qui peuvent être couplés, sont : (i) soit **invasifs\*** lorsqu'ils nécessitent l'effraction de la boîte crânienne pour leur mise en place ; (ii) soit **non-invasifs\*** lorsqu'ils restent extérieurs au corps. Peuvent y être associés des dispositifs connectés à de multiples capteurs (mouvements oculaires, variation de la fréquence cardiaque, conductance de la peau...) qui renseignent indirectement sur le contrôle que le cerveau exerce sur les organes.

L'association d'un dispositif de modulation à un dispositif de détection dans le cadre d'un système en boucle fermée (*biofeedback*) permet l'adaptation de la stimulation en temps réel. Des progrès récents permettent la combinaison de l'analyse des données neurales et de l'intelligence artificielle générative pour en faciliter l'interprétation, ce qui rend ainsi possible la synthèse vocale ou l'écriture rapide en temps réel.

### 1. Dans le domaine médical

Ces dispositifs ont été développés dans le domaine de la recherche pour comprendre le fonctionnement du cerveau et pallier les conséquences fonctionnelles des lésions induites par les traumatismes ou maladies du système nerveux.

Les réseaux de neurones actifs dans le cerveau sont soumis à une intense activité métabolique et produisent des signaux électriques. Cette activité électrique est enregistrée grâce à des électrodes. L'enregistrement sera d'autant plus fidèle au signal qu'il sera effectué à proximité de sa source : c'est le cas des méthodes invasives qui placent les électrodes à la surface du cortex cérébral ou dans la profondeur du cerveau. Les enregistrements externes non invasifs sont moins performants (**Électro-Encéphalo-Graphie\* -EEG-**) bien qu'ayant fait de réels progrès grâce aux innovations informatiques. La miniaturisation à l'extrême, à l'origine de dispositifs légers comme les électrodes intra-auriculaires ou lunettes connectées, améliore le confort du recueil mais donne accès à un signal de moindre qualité.

L'activité métabolique des neurones peut être analysée par **l'imagerie fonctionnelle\*** soit dans le cadre de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRMf), soit par l'imagerie isotopique comme la tomographie par émission de positons (TEP).

La modulation électrique de l'activité cérébrale par stimulation cérébrale profonde est réalisée à l'aide d'électrodes de stimulation couplées ou non avec les électrodes de recueil. Cette stimulation peut produire des effets activateurs ou inhibiteurs sur les réseaux de neurones suivant la topographie des régions fonctionnelles stimulées. Les stimulations externes utilisent différents types de courants électriques ou de champs magnétiques (Stimulation Magnétique Transcranienne -SMT-). La recherche tente de mieux comprendre les effets immédiats et retardés de ces stimulations sur l'activité du cerveau.

La **stimulation cérébrale profonde\*** mise en œuvre pour la première fois en France par les Prs A. Benabid et P.Pollak produit des effets spectaculaires dans le traitement de la maladie de Parkinson. Cette technique de traitement efficace dans des indications très précises au cours de cette maladie est aujourd'hui rentrée dans la routine. D'autres maladies neurologiques, comme certains mouvements anormaux, sont améliorées par la stimulation profonde d'autres régions cérébrales. Cette technique se développe également en psychiatrie en particulier dans le traitement des troubles obsessionnels compulsifs (TOC) graves, et fait l'objet d'intenses recherches dans le domaine des dépressions.

Très utilisée en recherche, la SMT est également utilisée dans le traitement de symptômes ou maladies neurologiques comme certaines douleurs neuropathiques, mouvements anormaux et maladies psychiatriques tels certains types de dépressions ou les Troubles Déficit Attention

Hyperactivité (TDAH), mais avec des résultats variables qui justifient de poursuivre les recherches cliniques en ce domaine.

Les **neuroprothèses**\* permettent de compenser une déficience sensorielle ou motrice. Les implants cochléaires sont utilisés avec succès depuis plusieurs décennies pour la réhabilitation de surdités sans lésion du nerf auditif. Il est plus difficile de restaurer une fonction visuelle dégradée par une maladie de la rétine mais la recherche progresse. Le pilotage de membres robotisés par le décodage de signaux cérébraux fait l'objet d'articles dans les médias. Permettre le geste finalisé d'un bras robotisé à partir de l'interprétation du code neural du mouvement qu'évoque la personne paralysée et de sa traduction dans la commande du robot est une prouesse spectaculaire. Il est également possible de permettre à des personnes atteintes de paralysies des membres inférieurs de remarcher grâce au pilotage d'un exosquelette. Il est aussi devenu possible de permettre à des personnes qui ont perdu les capacités de s'exprimer en raison de lésions irréversibles des voies motrices de reconstituer une parole en temps réel par le pilotage d'un système de synthèse vocale.

## 2. Hors domaine médical

L'usage des neurotechnologies se développe dans de nombreux domaines, professionnels, éducatifs, militaires, sportifs, ludiques. En France, les dispositifs semi-invasifs ou invasifs ne sont autorisés que dans un contexte médical contrairement à certains pays comme les États-Unis où la société Neuralink (E. Musk) propose des dispositifs invasifs supposés augmenter les performances cognitives. Cependant, la commercialisation de dispositifs légers s'accroît, ce qui rend nécessaire une prise de conscience des avantages et limites de l'utilisation de ces outils.

Dans le *domaine professionnel*, les interfaces cerveau-machine peuvent être utilisées pour détecter des variations d'attention, des fluctuations de la vigilance, ou l'irruption d'états de stress dans le but d'améliorer la sécurité collective, par exemple pour les pilotes d'avion ou les conducteurs de train. On peut même envisager des dispositifs modulant l'activité cérébrale au moment de la détection de signaux d'alerte.

Dans le *domaine éducatif*, certains pays utilisent déjà les interfaces cerveau-machine pour analyser le niveau d'attention des enfants en situation scolaire. L'objectif affiché est de favoriser les apprentissages et personnaliser les rythmes scolaires. Cela fait l'objet de recherches pour les enfants en situation de dysfonctionnements cognitifs (dyslexie, dyspraxie ...), ou dans le cadre de recherches en pédagogie.

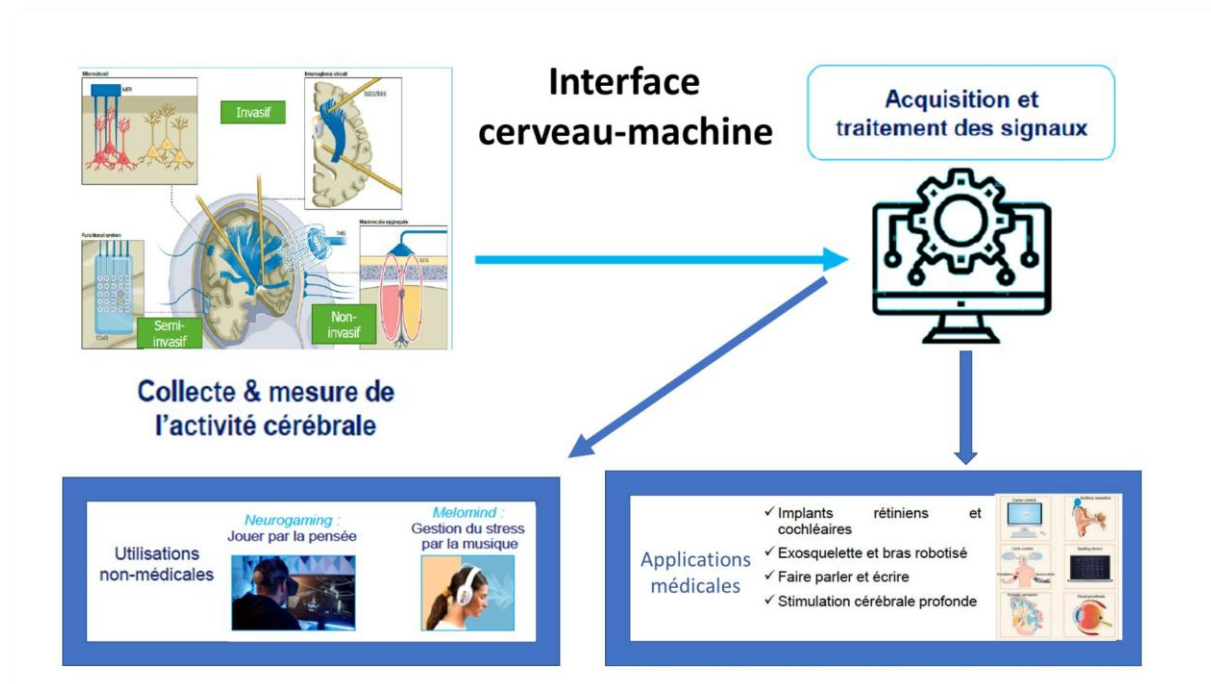
Dans le *domaine sportif*, les interfaces cerveau-machine couplées à d'autres capteurs pourraient permettre l'amélioration de performances de haut niveau.

Des applications de neurotechnologies sont envisagées dans le domaine *de la cryptographie et de l'authentification*.

Dans le *domaine des loisirs* comme les jeux vidéo, des firmes proposent déjà de piloter les cibles sur un écran sans l'utilisation de la main. L'animation de personnages virtuels par pilotage de leurs mouvements par le joueur en réalité virtuelle ou dans un métavers est

envisageable. Dans un contexte de réalité virtuelle, les interfaces cerveau-machine peuvent être utilisées pour analyser les corrélats cérébraux des réactions comportementales induites par les situations de simulation.

Dans le *domaine de l'amélioration des performances cognitives*, les développements proposés actuellement (amélioration de la mémoire, gestion du stress, régularisation du sommeil) sont des dispositifs à visée commerciale sans preuve scientifique de leur efficacité.



Source : Agence de la Biomédecine

## Quelques fausses croyances ou neuromythes (selon Hervé Chneiweiss)

« **Nous n'utilisons que 5% des capacités de notre cerveau** »

C'est faux : toutes les régions du cerveau sont actives en permanence. Chez l'homme, de vastes régions cérébrales sont consacrées aux fonctions associatives essentielles au bon fonctionnement du cerveau. Il est donc illusoire de vouloir augmenter les capacités cognitives en mobilisant les 95% qui seraient « endormis ».

« **Le cerveau fonctionne comme un ordinateur** »

C'est faux. Bien qu'ils traitent tous les deux des informations, leur fonctionnement est totalement différent.

« **On peut lire dans les pensées, piloter un ordinateur par la pensée** »

Ce sont des raccourcis abusifs, des abus de langage qui, s'ils permettent de mieux faire comprendre les principes de fonctionnement des ICM, ne reflètent pas la réalité des mécanismes mis en jeu. Par exemple, le processus d'entraînement-machine pour permettre l'utilisation d'un membre robotisé est très long, dépend de l'individu, et chez certaines personnes, impossible à atteindre.

## Les questions éthiques soulevées par les neurotechnologies

### 1. Les données neurales

Les données neurales sont des données médicales, porteuses d'informations liées à l'intimité de l'individu. Elles sont identifiantes. Ce sont donc des données à caractère personnel sensibles, au sens du Règlement général pour la protection des données (RGPD). Divers biais sont susceptibles d'apparaître au cours de leur analyse et de leur interprétation. L'utilisation de l'intelligence artificielle\* expose également aux biais liés à cette technologie. Elles peuvent faire l'objet d'usages détournés (commercialisation, surveillance, manipulation, incitation non consciente).

### 2. La technologie des dispositifs

Les neurotechnologies sont des outils numériques qui, à ce titre, doivent répondre aux principes de l'éthique du numérique exposés dans les avis correspondants du Comité consultatif national d'éthique du numérique (CCNEN) et rappelés dans la charte de développement responsable des neurotechnologies\* publiée par l'Agence de la Biomédecine : fiabilité et durabilité, sûreté, sécurité, explicabilité, protection des données.

### 3. Le respect des valeurs et principes fondamentaux

Les neurotechnologies exploitent les données neurales, reflets intimes de la vie mentale de chaque individu, et dans les situations de modulation, peuvent modifier l'activité du cerveau de manière plus ou moins consciente. Sont évidemment sollicités les valeurs et principes fondamentaux qui fondent la dignité de la personne humaine : autonomie de la personne, liberté de penser et d'agir, conscience et maîtrise de ses actes (agentivité), maintien de l'identité du soi, privauté de la vie mentale, absence de manipulation non consentie ou abusive de l'activité du cerveau.

### 4. Éthique, neurotechnologies et applications médicales

- *Dans le contexte du soin*

Comme dans toute action de soin, l'utilisation de neurotechnologies impose le **recueil du consentement de la personne**. Dans ce contexte, l'information est parfois difficile à transmettre chez des personnes très vulnérables, multidéficientes ou atteintes de maladies mentales. Lorsqu'elle implique une modulation de l'activité cérébrale, l'information doit insister

sur la possibilité d'effets latéraux indésirables de la stimulation, dont la personne concernée sera plus ou moins consciente. Par exemple, on constate l'apparition d'effets néfastes de la stimulation cérébrale profonde chez certaines personnes atteintes de maladie de Parkinson : modification de la personnalité, addiction au jeu ou au sexe, troubles psychiatriques (un patient parkinsonien stimulé indique : « je me suis demandé finalement qui j'étais... »). Le consentement doit également faire l'objet d'une clause spécifique concernant les usages directs et dérivés des données neurales.

Le respect des principes de bienfaisance et de non-malfaisance est toujours discuté dans des réunions de concertation car la mise en œuvre de tels dispositifs implique l'intervention d'équipes multidisciplinaires. L'équité d'accès est questionnée pour ces dispositifs très onéreux en particulier pour les neuroprothèses.

- ***Dans le contexte de la recherche***

Toute recherche sur les neurotechnologies impose un avis favorable d'un Comité de protection des personnes (CPP). L'information délivrée pour obtenir le consentement à la participation à la recherche doit être explicite sur les risques et les incertitudes si les expérimentations réalisées comportent une modulation de l'activité cérébrale ou sa manipulation inconsciente. La gestion des éventuelles découvertes incidentes doit être claire. La diffusion des résultats des recherches en science ouverte peut exposer à des utilisations détournées à des fins de contrôle, surveillance ou manipulation.

## ***5. Éthique, neurotechnologies et applications hors contexte médical***

L'amélioration des performances physiques et cognitives est à l'origine de l'essor récent d'innovations neurotechnologiques dans le cadre conceptuel de « l'humain augmenté ». Ces neurotechnologies non médicales, qui ne sont pas soumises aux mêmes contrôles réglementaires stricts, sont développées à des fins commerciales, souvent sans preuve scientifique de leur efficacité et sans connaissance de leurs effets indésirables potentiels.

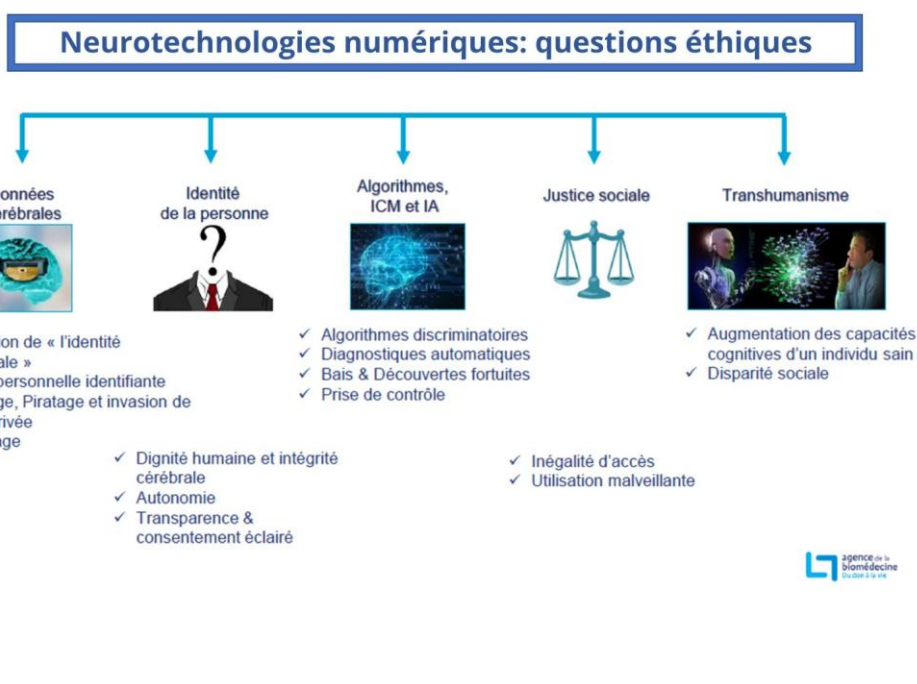
Dans le contexte professionnel, si l'amélioration de la sécurité collective est un objectif louable, de nombreux obstacles s'opposent à une large diffusion des ICM : respect de la vie privée, respect de la législation du travail, questions liées à la surveillance des salariés et à l'utilisation de ces outils dans l'évaluation des candidats à l'embauche.

L'utilisation des ICM dans le contexte des jeux numériques, déjà mis en œuvre par certaines sociétés, pourrait renforcer leurs propriétés addictives et créer une distorsion de l'image corporelle en « incorporant », au sens premier du terme, l'outil numérique. De même il faut éviter la diffusion des ICM qui court-circuitent les systèmes cérébraux de la prise de décision, particulièrement si des enjeux financiers en sont l'objet.

Les ICM grand public destinées à améliorer la santé mentale, favoriser le « bien-être », régulariser le sommeil, atténuer le stress, améliorer la mémoire, n'ont pour la plupart été soumises à aucune évaluation rigoureuse. Elles bénéficient d'un effet placebo puissant mais leur innocuité est incertaine. Il faut également être conscients que de tels outils pourraient être

aussi utilisés dans le domaine commercial ou politique pour favoriser l'incitation positive (*nudging\**) dans des situations de choix décisionnels.

Une attention particulière doit être accordée à l'utilisation des ICM dans le domaine éducatif, surtout si des interventions de modulation cérébrale sont envisagées. La maturité cérébrale est acquise tardivement, à l'âge adulte, le cerveau de l'enfant est flexible et donc vulnérable. L'utilisation de ces technologies en dehors de tout contexte médical (enfants avec déficiences cognitives) ou de recherche, clinique ou pédagogique, devrait être proscrite. Il faut également rappeler les risques liés à l'utilisation des ICM dans les jeux vidéo.



Source : Agence de la Biomédecine

## Pour approfondir quelques suggestions de lectures

- [UNESCO : aspects éthiques des neurotechnologies \(rapport\)](#)
- [UNESCO : avant-projet de recommandations sur l'éthique des neurotechnologies](#)
- [Agence de la Biomédecine : charte du développement responsable des neurotechnologies](#)
- **Avis xxx CCNE/CCNEN : Neurotechnologies numériques : questions d'éthique**  
*À paraître*
- **L'homme augmenté (essai).** Raphaël Gaillard (Ed. Grasset et Fasquelle 2024)
- **Neuropromesses : Une enquête philosophique sur les frontières des neurosciences.** Denis Forest (Ed. Ithaque 2022)
- **Notre Cerveau.** Hervé Chneiweiss (Ed. L'iconoclaste 2019)
- [La rencontre des neurosciences et de l'intelligence artificielle. La lettre de l'Agence de la Biomédecine. Juillet 2023](#)

## Glossaire

**Données neurales** (ou neurodonnées de l'anglais *neural data*) : données qualitatives et quantitatives concernant la structure, l'activité et la fonction du système nerveux, recueillies grâce aux neurotechnologies. Il s'agit des mesures ou observations les plus directes des états du système nerveux, états dont plusieurs sont corrélés à des états mentaux. Les données cérébrales (terme souvent utilisé dans le même sens) sont les données neurales concernant spécifiquement le cerveau

**Electroencéphalogramme (EEG)** : enregistrement de l'activité électrique du cerveau en temps réel à l'aide d'électrodes placées sur le cuir chevelu.

**Imagerie cérébrale (ou neuroimagerie)** : La neuroimagerie structurelle fournit des informations sur la forme et la structure du cerveau ; elle fait appel à l'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui utilise un champ magnétique ou à la tomodensitométrie (TDM ou CT-scan) qui utilise les rayons X. La neuroimagerie fonctionnelle donne des informations dynamiques sur le cerveau en activité.

**Intelligence artificielle** : voir la définition dans le dossier consacré à l'IA en santé.

**Interface cerveau-machine (ICM)** : terme générique désignant un système de liaison directe entre un cerveau et un ordinateur. L'interface est formée d'électrodes qui captent un signal transmis à l'ordinateur qui l'interprète et déclenche une réponse. Désigne également des dispositifs dans lesquels un signal issu de l'ordinateur est transmis au cerveau pour délivrer une information (prothèse sensorielle) ou moduler son activité (stimulation cérébrale profonde)

**Invasif, non invasif** : dans le domaine des neurotechnologies un dispositif invasif est situé à l'intérieur du crâne, soit à la surface du cerveau, soit à l'intérieur de celui-ci. Les composants d'un dispositif non invasif ne pénètrent pas à l'intérieur du corps.

**Neuroprothèse** : dispositif médical numérique ou électromécanique relié au système nerveux, qui permet de pallier la défaillance d'un organe ou d'une fonction.

**Neurotechnologies** : les neurotechnologies font référence aux appareils, systèmes et procédures – englobant à la fois le matériel et les logiciels – qui permettent de mesurer directement le système nerveux, d'y accéder, de le surveiller, de l'analyser, d'en prévoir l'activité ou de la moduler, afin de comprendre, influencer, restaurer ou anticiper sa structure, son activité et sa fonction.

**Nudging** : dispositifs de suggestion indirecte qui influencent les décisions mais respectent la liberté de choix de l'individu.

**Stimulation cérébrale** : modulation de l'activité cérébrale grâce à l'application d'une stimulation électrique ou magnétique. Elle peut être invasive (stimulation cérébrale profonde) grâce à des électrodes placées à la surface ou en profondeur du cerveau, ou non invasive par voie transcrânienne.

*Ce document a été élaboré avec l'aide de Catherine Tessier, directrice de recherche et référente intégrité scientifique et éthique de la recherche à l'ONERA, membre du Comité consultatif national d'éthique du numérique.*