

# La lettre

## de la biomédecine

Mars 2023

Veille stratégique en santé

#1

État des lieux  
de la recherche  
en neurotechnologies  
un défi pour la  
bioéthique

Revue de la littérature  
commentée

 agence de la  
biomédecine  
Du don à la vie

# La lettre de la biomédecine, veille stratégique en santé :

Est un bulletin périodique réalisé par le Pôle recherche, Europe, international et veille de la Direction générale médicale et scientifique de l'Agence de la biomédecine.

## Direction de l'édition

### Marine Jeantet

Directrice générale,  
Agence de la biomédecine.

### Michel Tsimaratos

Directeur général adjoint en charge  
des stratégies médicales et  
scientifiques,  
Agence de la biomédecine.

## Autrice

### Hadhemi Kaddour Robin

Cheffe de projet recherche et  
neurosciences, Pôle Recherche  
Europe International et Veille,  
Agence de la biomédecine.

## Contributeurs

### Hervé Chneiweiss

**Éditorialiste**  
Neurobiologiste et Président du comité  
d'éthique de l'INSERM.

### Samuel Arrabal

**Comité éditorial**  
Responsable Pôle Recherche Europe  
International et Veille,  
Agence de la biomédecine.

### Nicolas Chatauret

**Comité éditorial**  
Chef de projet recherche, Pôle  
Recherche Europe International et  
Veille, Agence de la biomédecine.

### Caroline Bogue

**Bibliographie**  
Documentaliste, Pôle Recherche  
Europe International et Veille,  
Agence de la biomédecine.

### Laure Desramé

**Conception graphique et diffusion**  
Chargée de communication  
institutionnelle et relations avec les  
publics, Agence de la biomédecine.

### Frédérique BARBUT

**Secrétaire de rédaction**  
Agence de la biomédecine.

### David Heard

Directeur de la Communication,  
Agence de la biomédecine.

### Sylviane Pint

Ancienne responsable du Pôle veille  
et ressources documentaires,  
Agence de la biomédecine.

# Sommaire

## **Chapitre 1**

« Neurotechnologies » ?

PAGE Erreur ! Signet non défini.

## **Chapitre 2**

Les neurotechnologies  
en santé

PAGE 6

## **Chapitre 3**

Neurotechnologies  
et usage non médical

PAGE 11

## **Chapitre 4**

Enjeux éthiques  
et sociétaux, notion de  
neuroéthique

PAGE 15

## **Chapitre 5**

Vers la naissance  
des neurodroits

PAGE 16

## **En bref**

PAGE 18

## **Glossaire**

PAGE 19



# Éditorial

**Pr Michel Tsimaratos**

Directeur général adjoint en charge des stratégies médicales et scientifiques, Agence de la biomédecine

## Une nouvelle collection pour de nouveaux enjeux

Le 2 août 2021, après une longue gestation, la loi relative à la bioéthique ajoute aux missions de l'Agence de la biomédecine une compétence spécifique en matière de neurosciences. L'agence est désormais chargée d'assurer une information permanente du Parlement et du Gouvernement sur le développement des connaissances et des techniques dans ce domaine.

Vaste sujet s'il en est, auquel s'ajoute une mission qui permet à l'Agence de la biomédecine de demander à être entendue par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) lorsque l'actualité scientifique des neurosciences le justifie.

Cette opportunité nous a amené à imaginer un nouveau format de publication, une lettre périodique en forme d'observatoire des enjeux et des avancées sur les questions de biomédecine et de bioéthique, avec, pour premier objet la question des neurosciences bien sûr, mais demain la vocation de traiter d'autres sujets.

Une veille plus qu'une alerte. Une façon de rester à l'avant-garde des transformations quel que soit leur aspect spectaculaire, et d'éclairer les décisions politiques en connaissance de cause, plus qu'en écho au bruit médiatique.

Cette mission, parfois considérée comme « cosmétique » en comparaison avec les autres dispositions de la loi, est passée un peu inaperçue aux yeux des journalistes et du public. Elle est pourtant au cœur des compétences de l'Agence, profondément ancrée dans son ADN. Etre à l'affût des signaux faibles, des émergences, faire dialoguer progrès scientifique et projet de société, pour accompagner le mouvement en avant de la civilisation, fonde toutes nos actions.

La succession des crises a transformé les règles de communication, aboli les normes et perturbé des équilibres qui semblaient stables. La multiplication des sources, des experts et des canaux de diffusion de l'information a été un des écueils que les États, mal préparés à la succession des crises, ont dû affronter.

Pour la première fois, la loi met en place les conditions pour passer de l'information continue à la connaissance et transformer les questions qui émergent de l'activité scientifique en connaissances utiles à la redéfinition des circuits décisionnels. Une façon d'anticiper sur ce que l'on ne connaît pas encore, pour retrouver la confiance et passer de l'infobésité à la connaissance stratégique. Une façon inédite d'éclairer la réflexion par la connaissance pour diminuer l'anxiété parfois ressentie devant l'inconnu.

La mission confiée à l'Agence de la biomédecine est une démarche qui permettra aux décideurs de se forger leur propre opinion dans un monde en transformation. Une démarche d'anticipation, d'intelligence collective, qui restaure la crédibilité des scientifiques, loin de la visibilité à tout prix et des dénigrements en tout genre qui ont réduit nos capacités d'adaptation aux crises.

Ce premier bulletin, sous forme de revue de la littérature commentée consacré aux neurotechnologies, a été réalisé par Hadhemi Kaddour-Robin au sein du pôle Relations internationales et recherche, avec l'aide du pôle Veille et recherche documentaire de l'Agence de la biomédecine. Il s'agit d'une réflexion transversale qui se nourrit d'interdisciplinarité, de regards croisés et d'expériences multiples, pour choisir sans hésiter le signal de la connaissance stratégique. Une piste pour retrouver du sens, dépasser les crises, et servir une ambition nouvelle.

La qualité de la recherche en neurosciences avance à grands pas. Dans ce premier numéro, qui a vocation à se répéter deux ou trois fois chaque année, nous vous proposons une sélection d'informations à haute valeur ajoutée, pour vous aider à vous forger votre propre opinion dans un monde en transformation.

Bonne lecture.



# Éditorial

**Pr Hervé Chneiweiss**

Neurobiologiste et Président du comité d'éthique de l'INSERM

L'activité cérébrale permet nos états cognitifs et affectifs, penser et agir. L'activité cérébrale est comme le code génétique : elle est particulière pour chacune et chacun de nous mais ses principes communs pour tous les êtres humains permettent de recueillir des informations inhérentes à tous, quels que soient leur genre, leur nationalité, leur langue ou leur religion.

La place centrale de l'activité cérébrale dans les notions d'identité, de liberté de pensée, d'autonomie, de vie pri-vée et d'épanouissement de l'être humain confère une importance primordiale à l'analyse de l'impact éthique, juridique et sociétal de l'enregistrement et/ou de la modulation de l'activité cérébrale au moyen de divers dispositifs techniques collectivement appelés neurotechnologies.

Les neurotechnologies peuvent être utilisées pour identifier les propriétés de l'activité du système nerveux, comprendre le fonctionnement du cerveau, diagnostiquer des conditions pathologiques, contrôler des dispositifs externes (neuroprothèse) grâce à des interfaces cerveau-machine, soigner par des processus invasifs (électrodes profondes de stimulation à hautes fréquences) ou encore réhabiliter grâce à une rééducation assistée (stimulation magnétique transcrânienne, neurofeedback).

Compte tenu des enjeux et de l'évolution rapide de ce domaine, de nombreuses voix s'élèvent pour demander un encadrement plus précis de l'usage de ces nouvelles technologies, peu encadrées dès que leur usage s'étend au-delà du champ de la santé. L'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) a adopté dès 2019 des recommandations pour un développement responsable des neurotechnologies dans le domaine de la santé. Toutefois, l'enjeu essentiel est celui de l'accessibilité, du traitement, du stockage et de l'utilisation des données cérébrales enregistrées. Le Comité international de bioéthique (CIB) de l'UNESCO a remis fin 2021 un rapport où il reconnaît le caractère personnel et sensible des données cérébrales.

La question est dès lors de savoir quels droits du cerveau, les neurodroits, doivent être défendus.

Les neurodroits comprennent : la liberté cognitive ou liberté d'une personne d'enregistrer, d'augmenter, ou d'améliorer ses processus cognitifs, ou de refuser de le faire ; la privacité mentale c'est-à-dire la liberté et la capacité d'une personne à garder privées ses informations mentales et à empêcher l'intrusion non consentie de tiers dans son domaine neurocognitive ; l'intégrité mentale ou interdiction de la manipulation non consentie et nuisible de l'activité neuronale d'une personne ; la continuité psychologique ou droit de préserver sa propre identité personnelle et la continuité de sa vie mentale contre toute altération extérieure par des tiers non consentie.

Pour le CIB, ces droits s'inscrivent dans le corpus existant des droits fondamentaux de tous les individus à l'intégrité physique et mentale, à l'intimité mentale, à la liberté de pensée et au libre arbitre, et le droit de profiter des avantages du progrès scientifique. Le CIB reconnaît la nécessité de protéger et promouvoir ces droits en ce qui concerne l'application des neurotechnologies.

La communauté internationale et chaque État doit dès lors examiner le droit positif existant pour s'assurer qu'il protège effectivement et explicitement les neurodroits, et amender ces textes autant que de besoin.

## Abréviations

CIB : Comité internationale de bioéthique de l'UNESCO

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

EEG : Électroencéphalographie

FDA : Food Drug Administration

IA : Intelligence artificielle

ICM : Interface cerveau-machine

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

NT : Neurotechnologies

OCDE : Organisation de coopération et de développement économique

OPECST : Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

# Chapitre 1

## « Neurotechnologies » ?

Il existe de nombreuses définitions aux neurotechnologies (NT), terme de plus en plus utilisé dans la santé et la vie quotidienne. Nous avons choisi de retenir la définition adoptée par le CIB dans son rapport sur « les enjeux éthiques des neurotechnologies » publié en 2021<sup>1</sup>. Selon cette définition, les NT englobent tous les dispositifs et procédures utilisés pour visualiser, surveiller, étudier, évaluer, manipuler et/ou reproduire la structure et le fonctionnement des systèmes neuronaux des êtres humains.

Le terme « invasif » caractérise des techniques qui nécessitent un contact direct avec le tissu nerveux pour analyser et/ou moduler l'activité cérébrale. Les techniques analysant ou modifiant l'activité cérébrale à partir de la surface extérieure du crâne et du cuir chevelu sont dites « non invasives ».

Le cerveau est un organe complexe dans son organisation et son fonctionnement. Le développement des NT constitue un défi majeur dans la compréhension de cet organe, mais également une source d'espoir dans le traitement des pathologies et des dysfonctionnements qui lui sont liés.

Depuis 1990, les maladies du système nerveux, troubles neurologiques et maladies mentales, constituent le premier poste de dépenses en santé, la principale cause d'invalidité à l'échelle mondiale et la deuxième cause de décès<sup>2</sup>. Ces dernières années, grâce à l'investissement majeur des pouvoirs publics et du secteur entrepreneurial, le domaine des NT, initialement développées dans le but de diagnostiquer et traiter certains troubles neurologiques, connaît une croissance rapide, notamment dans un cadre qui dépasse largement le domaine médical : éducation, sécurité, marketing, jeu.

Le marché mondial des NT est estimé à 9,8 milliards de dollars en 2022 et atteindra 17, milliards de dollars en 2026<sup>3</sup>. Secteur dynamique et prometteur, il se segmente selon la finalité d'utilisation, qui peut être médicale ou non médicale. L'utilisation des NT à des fins non médicales par des utilisateurs non avertis ouvre de nombreuses questions d'ordre éthique, économique, sociétal et juridique.

## Chapitre 2

# Les neurotechnologies en santé

Depuis les années 1990, les avancées des techniques d'imagerie cérébrale, ou neuroimagerie, ont révolutionné notre compréhension du cerveau. Avec les données qu'elles génèrent, les techniques de neuroimagerie ont apporté aux chercheurs et aux médecins des outils permettant d'explorer l'organe et de poser des diagnostics.

Elles ont également permis l'émergence des NT pour traiter des handicaps, certaines maladies ou lésions cérébrales. Dans le domaine de la santé, les NT peuvent être répertoriées en trois domaines d'applications : l'exploration du cerveau pour mieux le comprendre et établir des diagnostics, la modification du fonctionnement cérébral pour soigner certaines pathologies et, enfin, l'amélioration/augmentation des capacités cérébrales d'un individu pour compenser une maladie ou un handicap.

### Explorer : Mieux comprendre pour mieux diagnostiquer

La neuroimagerie est utilisée pour observer la structure et le fonctionnement du cerveau et des tissus avoisinants, afin d'aider le clinicien à faire un diagnostic. Les techniques d'exploration sont nombreuses et variées, allant de mesures très simples à mettre en oeuvre et peu coûteuses, telles que l'électroencéphalographie (EEG), qui mesure l'activité électrique du cerveau en temps réel mais avec une faible résolution spatiale, à des outils plus complexes, tels que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui permet de visualiser les variations d'activités des différentes régions du cerveau avec une moindre précision temporelle, mais une grande précision anatomique (cf. Focus « Types de données cérébrales »).

1 CIB. (2021). *Rapport du Comité International de Bioéthique de l'UNESCO (CIB) sur les aspects éthiques des neurotechnologies*. SHS/BIO/IBC-28/2021/3 Rev. Paris, 56p. [En ligne]. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378724\\_fre](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378724_fre) [Consulté le 16 février 2023].

2 Feigin, V. L., Nichols, E., Alam, T., Bannick, M. S., Beghi, E., Blake, N., Culpepper, W. J., Dorsey, E. R., Elbaz, A., Ellenbogen, R. G., Fisher, J. L., Fitzmaurice, C., Giussani, G., Glennie, L., James, S. L., Johnson, C. O., Kassebaum, N. J., Logroscino, G., Marin, B., Vos, T. (2019). *Global, regional, and national burden of neurological disorders, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016*. *The Lancet Neurology*, 18(5), 459-480.

3 *Neurotech Reports*. (2022). *The Market for Neuro technology: 2022-2026. A Market Research Report from Neurotech Reports Executive Summary*. 254p.

## Types de données cérébrales

Deux techniques d'imagerie fournissent des informations en temps réel sur le fonctionnement du cerveau d'un individu permettant de définir des schémas d'activité cérébrale spécifique à un individu, et donc identifiante.

**a. L'EEG** est une méthode d'exploration du cerveau non invasive qui permet de mesurer l'activité électrique du cerveau par l'intermédiaire d'électrodes placées sur le cuir chevelu. Cet examen renseigne sur l'activité neurophysiologique du cerveau. L'EEG mesure l'activité cérébrale avec une grande précision temporelle, milliseconde par milliseconde, et permet d'orienter un diagnostic, de suivre les effets d'un traitement ou est utilisée dans la recherche en neurosciences cognitives.

**b. L'IRMf** est une technique d'imagerie cérébrale non invasive permettant d'obtenir des vues en deux ou en trois dimensions de l'intérieur du corps en temps réel. Au niveau du cerveau, elle mesure les changements locaux de flux sanguin dus à une activation neuronale et permet par conséquent d'identifier les aires cérébrales impliquées dans l'exécution de diverses tâches motrices, sensorielles, cognitives et émotionnelles

Les applications de ces dispositifs de neuroimagerie sont diverses. Par exemple, dans le cas de patients épileptiques, elles peuvent dans un premier temps permettre d'identifier la pathologie. Ensuite, la région source de l'épilepsie dans le cerveau peut être localisée au moyen de méthodes plus invasives avec une grande précision. Grâce à cette localisation, une ablation du tissu anormal ou d'autres interventions chirurgicales peuvent être mises en oeuvre pour soulager les patients<sup>4,5</sup>.

La neuroimagerie est également utilisée comme outil de diagnostic dans certains troubles neurologiques, tels que la sclérose en plaques, la maladie d'Alzheimer, les troubles de déficit de l'attention, le spectre autistique et la dépression<sup>6,7,8</sup>. Ces pathologies ont des « signatures cérébrales » spécifiques appelées biomarqueurs cérébraux<sup>9,10,11</sup>. Ces derniers ouvrent un champ intéressant dans le diagnostic précoce des maladies mais offrent également la possibilité d'optimiser et de personnaliser les traitements des patients.

Récemment, l'identification de ces biomarqueurs a été couplée à des algorithmes dit d'apprentissage machine ou machine learning, afin d'améliorer et d'accélérer la précision du diagnostic.

En France, selon l'impact de leur utilisation sur le patient, certains de ces logiciels sont d'ores et déjà considérés comme des dispositifs médicaux de diagnostic ayant une finalité médicale. Ils doivent, de ce fait, être marqués par la certification européenne attestant de leur conformité à la réglementation européenne entrée en vigueur le 26 mai 2021. Ces dispositifs médicaux entrent dans le champ de surveillance de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM)<sup>12,13</sup>.

4 Cendes, F., Theodore, W. H., Brinkmann, B. H., Sulc, V. et Cascino, G. D. (2016). *Neuroimaging of epilepsy. Handbook of Clinical Neurology*, 136, 985-1014.

5 Sidhu, M. K., Duncan, J. S. et Sander, J. W. (2018). *Neuroimaging in epilepsy. Current Opinion in Neurology*, 31(4), 371-378.

6 Nielsen, A. N., Barch, D. M., Petersen, S. E., Schlaggar, B. L. et Greene, D. J. (2020). *Machine Learning With Neuroimaging: Evaluating Its Applications in Psychiatry. Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 5(8), 791-798.

7 Pellegrini, E., Ballerini, L., Hernandez, M. D. C. V., Chappell, F. M., González-Castro, V., Anblagan, D., Danso, S., Muñoz-Maniega, S., Job, D., Pernet, C., Mair, G., MacGillivray, T. J., Trucco, E. et Wardlaw, J. M. (2018). *Machine learning of neuroimaging for assisted diagnosis of cognitive impairment and dementia: A systematic review. Alzheimer's & Dementia: Diagnosis, Assessment & Disease Monitoring*, 10(1), 519-535.

8 Mateos-Pérez, J. M., Dadar, M., Lacalle-Auriales, M., Iturria-Medina, Y., Zeighami, Y. et Evans, A. C. (2018). *Structural neuroimaging as clinical predictor: A review of machine learning applications. NeuroImage : Clinical*, 20, 506-522.

9 Janssen, R. J., Mourão-Miranda, J. et Schnack, H. G. (2018b). *Making Individual Prognoses in Psychiatry Using Neuroimaging and Machine Learning. Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 3(9), 798-808.

10 Kraguljac, N. V., McDonald, W. M., Widge, A. S., Rodriguez, C. I., Tohen, M. & Nemeroff, C. B. (2021). *Neuroimaging Biomarkers in Schizophrenia. American Journal of Psychiatry*, 178(6), 509-521.

11 Kang, S. G. et Cho, S. E. (2020). *Neuroimaging Biomarkers for Predicting Treatment Response and Recurrence of Major Depressive Disorder. International Journal of Molecular Sciences*, 21(6), 2148.

12 Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des Produits de Santé (ANSM). *Les dispositifs médicaux et les dispositifs médicaux de diagnostic in vitro (DMDIV)*. [En ligne]. <https://ansm.sante.fr/qui-sommes-nous/notre-perimetre/les-dispositifs-medicaux-et-les-dispositifs-medicaux-de-diagnostic-in-vitro/p/les-dispositifs-medicaux-et-les-dispositifs-medicaux-de-diagnostic-in-vitro-dmdiv> [Consulté le 16 février 2023].

13 Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des Produits de Santé (ANSM). *Logiciels et applications mobiles en santé*. [En ligne]. <https://ansm.sante.fr/documents/referance/reglementation-relative-aux-dispositifs-medicaux-dm-et-aux-dispositifs-medicaux-de-diagnostic-in-vitro-dmdiv/logiciels-et-applications-mobiles-en-sante> [Consulté le 16 février 2023].

## Neuroréhabiliter : comment apprendre à notre cerveau à se réorganiser ?

À côté des méthodes de neuroimagerie, se sont développées des techniques biomédicales de modification du fonctionnement du cerveau regroupées sous le terme neuroréhabilitation. Celle-ci est basée sur l'une des découvertes les plus importantes dans le monde des neurosciences, la plasticité neuronale<sup>14</sup>, entraînant un changement de paradigme dans le traitement des troubles neurologiques et des lésions cérébrales.

En effet, ce n'est qu'à la fin des années 1970 que cette théorie fût validée par la communauté scientifique qui a ainsi admis que le cerveau est capable de se modifier afin de créer, défaire ou réorganiser ses réseaux de neurones et leurs connexions. Le cerveau qualifié de « plastique » peut dans une certaine mesure « se réparer ».

Prise au sens large, cette capacité est à la base de l'apprentissage, pendant l'enfance et tout au long de la vie. La neuroréhabilitation inclut donc toute forme de techniques utilisant la capacité du cerveau à se reconfigurer, pour « compenser » un trauma ou une lésion cérébrale par exemple.

Ces thérapies d'apprentissage peuvent être non invasives grâce à des dispositifs posés à la surface du crâne. C'est le cas des procédés de neurofeedback qui se basent sur la capacité d'un individu à moduler sa propre activité cérébrale, supposée être associée à un comportement ou à une pathologie spécifique afin de le ou la corriger, après exposition à des stimulations auditives, visuelles ou sensorielles<sup>15,16,17</sup>.

Utilisées pour réduire les troubles post-traumatiques, de l'attention, du comportement, du sommeil, de l'apprentissage ou encore le traitement de la schizophrénie ou de la maladie de Parkinson, l'efficacité clinique des techniques de neurofeedback restent encore à l'étude<sup>18,19,20,21,22,23,24</sup>.

D'autres NT non invasives basées sur la neurostimulation, utilisant le courant électrique, la lumière, les ultrasons ou encore le champ magnétique à la surface du crâne, sont prometteuses dans le traitement des troubles neurologiques et psychiatriques pour lesquels les traitements pharmacologiques sont peu ou non efficaces : hallucinations, dépression majeure, douleurs intractables, schizophrénie<sup>25,26,27,28</sup> (cf. Focus « Neurostimulation électrique ou magnétique à visée thérapeutique »).

De la même façon que les dispositifs de neurofeedback et bien que ces NT fassent l'objet de nombreuses applications dans le domaine médical, la réalité de certains leurs effets reste controversée.

14 Johnson, B. P. et Cohen, L. G. (2022). *Reward and plasticity: Implications for neurorehabilitation. Handbook of Clinical Neurology*, 184, 331-340.

15 Nahum, M., Lee, H. & Merzenich, M. M. (2013). *Principles of Neuroplasticity-Based Rehabilitation. Changing Brains - Applying Brain Plasticity to Advance and Recover Human Ability*, 141 171.

16 Sitaram, R., Ros, T., Stoekel, L., Haller, S., Schamowski, F., Lewis-Peacock, J., Weiskopf, N., Blefari, M. L., Rana, M., Oblak, E., Birbaumer, N. & Sulzer, J. (2019). *Author Correction: Closed-loop brain training: the science of neurofeedback. Nature Reviews Neuroscience*, 20(5), 314 314.

17 Mirifar, A., Keil, A. et Ehrlenspiel, F. (2022). *Neurofeedback and neural self-regulation: a new perspective based on allostasis. Reviews in the Neurosciences*, 33(6), 607-629.

18 Patil, A. U., Madathil, D., Fan, Y. T., Tzeng, O. J. L., Huang, C. M. et Huang, H. W. (2022). *Neurofeedback for the Education of Children with ADHD and Specific Learning Disorders: A Review. Brain Sciences*, 12(9), 1-22.

19 Cancer, A., Vanutelli, M. E., Lucchiari, C. et Antonietti, A. (2021). *Using Neurofeedback to Restore Inter-Hemispheric Imbalance: A Study Protocol for Adults with Dyslexia. Frontiers in Psychology*, 12, 1-24.

20 Micoulaud-Franchi, J. A., Jeunet, C., Pelissolo, A. & Ros, T. (2021). *EEG Neurofeedback for Anxiety Disorders and Post-Traumatic Stress Disorders: A Blueprint for a Promising Brain-Based Therapy. Current Psychiatry Reports*, 23(12).

21 Lambert-Beaudet, F., Journault, W. G., Rudziavic Provençal, A. et Bastien, C. H. (2021). *Neurofeedback for insomnia: Current state of research. World Journal of Psychiatry*, 11(10), 897-914.

22 Anil, K., Hall, S. D., Demain, S., Freeman, J. A., Ganis, G. et Marsden, J. (2021). *A Systematic Review of Neurofeedback for the Management of Motor Symptoms in Parkinson's disease. Brain Sciences*, 11(10), 1292, 1-17.

23 Trambaiolli, L. R., Cassani, R., Mehler, D. M. A. et Falk, T. H. (2021). *Neurofeedback and the Aging Brain: A Systematic Review of Training Protocols for Dementia and Mild Cognitive Impairment. Frontiers in Aging Neuroscience*, 13, 1-19.

25 Xia, Y., Xu, Y., Li, Y., Lu, Y. et Wang, Z. (2022). *Comparative Efficacy of Different Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Protocols for Stroke: A Network Meta-Analysis. Frontiers in Neurology*, 13, 1-11.

24 Hirano, Y. et Tamura, S. (2021). *Recent findings on neurofeedback training for auditory hallucinations in schizophrenia. Current Opinion in Psychiatry*, 34(3), 245-252.

26 Konicar, L., Prillinger, K., Klöbl, M., Lanzenberger, R., Antal, A. et Plener, P. L. (2022). *Brain Stimulation for Emotion Regulation in Adolescents With Psychiatric Disorders: Study Protocol for a Clinical-Transdiagnostic, Randomized, Triple-Blinded and Sham-Controlled Neurotherapeutic Trial. Frontiers in Psychiatry*, 13, 1-13.

27 Xue, T., Chen, S., Bai, Y., Han, C., Yang, A. et Zhang, J. (2022). *Neuromodulation in drug-resistant epilepsy: A review of current knowledge. Acta Neurologica Scandinavica*, 146(6), 786-797.

28 Wong, J. K., Deuschl, G., Wolke, R., Bergman, H., Muthuraman, M., Groppa, S., Sheth, S. A., Bronte-Stewart, H. M., Wilkins, K. B., Petrucci, M. N., Lambert, E., Kehnemouyi, Y., Starr, P. A., Little, S., Anso, J., Gilron, R., Poree, L., Kalamangalam, G. P., Worrell, G. A., . . . Okun, M. S. (2022). *Proceedings of the Ninth Annual Deep Brain Stimulation Think Tank: Advances in Cutting Edge Technologies, Artificial Intelligence, Neuromodulation, Neuroethics, Pain, Interventional Psychiatry, Epilepsy, and Traumatic Brain Injury. Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 1-21.



À l'inverse, le recours à la stimulation cérébrale profonde, découverte de la recherche française et méthode appliquée avec efficacité pour la première fois dans les années 1990 chez des patients parkinsoniens<sup>29</sup>, a été approuvé dans le traitement d'un certain nombre d'autres pathologies, telles les dystonies (contractions involontaires des muscles), l'épilepsie et les troubles obsessionnels compulsifs.

Cette NT invasive consiste à implanter deux électrodes situées en profondeur dans des structures spécifiques du cerveau pour délivrer un courant électrique de faible intensité. Elle a permis une amélioration considérable de la qualité de vie de certains patients.

Cependant, son usage reste limité en raison d'effets secondaires de mécanismes encore peu connus et souvent sous-estimés. Des effets indésirables tels que la psychose maniaco-dépressive, l'apathie, l'hypersexualité ou encore des sautes d'humeurs ont été rapportés dans certains cas.

La stimulation électrique du cerveau a aussi été évaluée dans une étude récente explorant la possibilité d'améliorer la mémorisation de patients, dont certains souffrant de lésions cérébrales, grâce à un implant cérébral ou « prothèse de mémoire ». Cette technique consiste à reproduire les impulsions électriques produites par l'hippocampe, structure cérébrale responsable de la mémoire, pendant l'encodage d'un nouveau souvenir à l'aide d'une électrode implantée dans le cerveau<sup>30</sup>.

À l'origine, ce dispositif visait à pallier les pertes de mémoire dues aux lésions cérébrales traumatiques subies par les membres des forces militaires, dans le cadre d'un projet de l'Agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense (DARPA)<sup>31</sup>.

## FOCUS

### Neurostimulation électrique ou magnétique à visée thérapeutique

Les stimulations transcrâniennes électrique ou magnétique sont des techniques biomédicales non invasives de modification du fonctionnement cérébral.

**a. La stimulation transcrânienne électrique à courant direct** module l'excitabilité cérébrale par le biais de l'application d'un faible courant électrique entre deux électrodes placées sur le cuir chevelu.

**b. La stimulation transcrânienne magnétique** stimule l'activité neuronale par le biais d'une série de courtes impulsions magnétiques appliqué sur une région du crâne. La stimulation des neurones ciblés induit la modification des circuits cérébraux sous-jacents.

Bien que faisant l'objet de nombreuses recherches médicales pour traiter certaines pathologies telles que la dépression, la douleur chronique, la schizophrénie, etc., leur bénéfice pour le patient reste controversé.

### Mimer les capacités cérébrales pour soulager le handicap

Certaines NT peuvent être utilisées pour améliorer les capacités cérébrales d'un individu malade ou souffrant d'un handicap sensoriel ou moteur.

Parmi les applications les plus remarquables, on trouve les neuroprothèses qui sont des dispositifs électroniques ou électromécaniques reliés au cerveau permettant de remplacer une fonction défectueuse.

Si certaines neuroprothèses, comme l'implant cochléaire qui est régulièrement proposé aux personnes souffrant d'un déficit auditif sévère ou profond, existent maintenant depuis plus de 60 ans<sup>32</sup>, ces dernières années, les solutions technologiques pour restaurer d'autres sens ont fait d'importants progrès.

29 Pollak P., Burkhard P. et Vingerhoets F. (2015). *Stimulation cérébrale profonde : passé, présent et avenir*. *Revue Médicale Suisse*, 1(472), 958-961.

30 Roeder, B. M., Riley, M. R., She, X., Dakos, A. S., Robinson, B. S., Moore, B. J., Couture, D. E., Laxton, A. W., Popli, G., Munger Clary, H. M., Sam, M., Heck, C., Nune, G., Lee, B., Liu, C., Shaw, S., Gong, H., Marmarelis, V. Z., Berger, T. W. Hampson, R. E. (2022). *Patterned Hippocampal Stimulation Facilitates Memory in Patients With a History of Head Impact and/or Brain Injury*. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 1-13.

31 Pava M. (2022). *Restoring Active Memory (RAM)*. DARPA. [En ligne]. <https://www.darpa.mil/program/restoring-active-memory> [Consulté le 16 février 2023].

32 Eshraghi, A. A., Nazarian, R., Telischi, F. F., Rajguru, S. M., Truy, E. & Gupta, C. (2012). *The Cochlear Implant: Historical Aspects and Future Prospects*. *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology*, 295(11), 1967-1980.

Les rétines artificielles devraient ainsi permettre de proposer aux personnes non aveugles de naissance mais atteintes de dégénérescence maculaire liée à l'âge une perception visuelle de haute résolution de leur environnement<sup>33</sup>.

Les handicaps moteurs constituent également un des principaux axes de développement des neuroprothèses. Les prothèses neuroélectriques sont les plus utilisées à ce jour et permettent de pallier à l'absence d'un membre supérieur suite à une amputation. Cette technique invasive requiert une intervention chirurgicale pour dévier les nerfs du bras vers la zone pectorale et fixer le membre prothétique équipé d'électrodes. Ces électrodes captent les informations vers le système nerveux afin de faire effectuer un mouvement au membre prothétique.

Des neuroprothèses dites motrices sont également utilisées chez des patients dans le cadre de programmes de rééducation des accidents vasculaires. Ces dispositifs stimulent électriquement une structure du système nerveux pour aider à l'exécution des activités quotidiennes dans le milieu naturel où vivent les patients<sup>34</sup>.

Ces neuroprothèses sont de plus en plus associées à une interface cerveau-machine (ICM). Celle-ci a pour rôle de connecter le cerveau (système nerveux) à un système informatique capable de réceptionner, d'analyser et de transformer le signal en action.

Dans l'objectif de restaurer un déficit moteur, les ICM peuvent permettre à des patients ayant une grave lésion de la moelle épinière à l'origine d'une paralysie sévère de contrôler le mouvement de la prothèse – ou de l'exosquelette – (cf. Focus « Exosquelette et intelligence artificielle »), d'adapter la commande du mouvement « pensé » et, pour les dispositifs les plus avancés, retrouver des sensations proches du membre intact (toucher, douleur...).

Ces ICM peuvent également contribuer à compenser partiellement un déficit de communication (déplacement de curseur d'ordinateur, décodage de la parole, orthographe des mots...) améliorant considérablement le quotidien de la personne.

Le couplage des NT avec l'intelligence artificielle (IA) offre de nouvelles perspectives pour améliorer la qualité de vie des patients. Certains systèmes de stimulation cérébrale couplée à une ICM fonctionnent déjà de façon autonome et pourraient bientôt être proposés aux patients parkinsoniens pour contrôler automatiquement leurs tremblements : une IA déclenche les stimulations quand elle l'estime nécessaire, alors que jusque-là le patient contrôlait lui-même son appareil<sup>35,36</sup>.

Chez les personnes paralysées, des microprocesseurs enregistrent les ondes cérébrales et les algorithmes d'IA les déchiffrent, ce qui leur permet de contrôler un exosquelette ou un curseur sur un écran d'ordinateur, et d'interagir ainsi avec le monde extérieur<sup>37,38,39</sup>. Nous traiterons ce sujet dans un numéro dédié à l'intelligence artificielle et les neurosciences ».

Ces possibilités de développement les rendent attractives pour le secteur privé. C'est le cas de la startup Neuralink, fondée par Elon Musk en 2017, qui fait le pari de pouvoir faire remarcher des personnes paralysées et traiter des maladies neurologiques grâce à un implant cérébral relié à une IA.

Un implant de ce type a été testé chez le porc puis chez le singe en 2022 et attend une autorisation de la Food Drug Administration (FDA) pour débiter les essais cliniques chez l'homme<sup>40,41</sup>.

Ces NT sont très prometteuses pour aider des patients lourdement handicapés, mais leur appellation de processus de neuroamélioration dit bien le potentiel d'usage au-delà du simple handicap et ce brouillage des lignes ouvre des questions éthiques et sociétales majeures.

33 Lozano, A., Suárez, J. S., Soto-Sánchez, C., Garrigós, J., Martínez-Alvarez, J. J., Ferrández, J. M. & Fernández, E. (2020b). *Neurolight: A Deep Learning Neural Interface for Cortical Visual Prosthesis*. *International Journal of Neural Systems*, 30(09), 2050045

34 Lebedev, M. A. & Nicolelis, M. A. L. (2017). *Brain-Machine Interfaces: From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation*. *Physiological Reviews*, 97(2), 767-837

35 Thenaisie, Y., Lee, K., Moerman, C., Scafa, S., Gálvez, A., Pirondini, E., Burri, M., Ravier, J., Puiatti, A., Accolla, E., Wicki, B., Zacharia, A., Castro Jiménez, M., Bally, J. F., Courtine, G., Bloch, J. & Moraud, E. M. (2022). *Principles of gait encoding in the subthalamic nucleus of people with Parkinson's disease*. *Science Translational Medicine*, 14(661).

37 Moses, D. A., Metzger, S. L., Liu, J. R., Anumanchipalli, G. K., Makin, J. G., Sun, P. F., Chartier, J., Dougherty, M. E., Liu, P. M., Abrams, G. M., Tu-Chan, A., Ganguly, K. & Chang, E. F. (2021). *Neuroprosthesis for Decoding Speech in a Paralyzed Person with Anarthria*. *New England Journal of Medicine*, 385(3), 217-227

38 Metzger, S. L., Liu, J. R., Moses, D. A., Dougherty, M. E., Seaton, M. P., Littlejohn, K. T., Chartier, J., Anumanchipalli, G. K., Tu-Chan, A., Ganguly, K. & Chang, E. F. (2022). *Generalizable spelling using a speech neuroprosthesis in an individual with severe limb and vocal paralysis*. *Nature Communications*, 13(1).

39 Benabid, A. L., Costecalde, T., Eliseyev, A., Charvet, G., Verney, A., Karakas, S., Foerster, M., Lambert, A., Morinière, B., Abroug, N., Schaeffer, M. C., Moly, A., Sauter-Starace, F., Ratel, D., Moro, C., Torres-Martinez, N., Langar, L., Oddoux, M., Polosan, M. Chabardes, S. (2019). *An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration*. *The Lancet Neurology*, 18(12), 1112-1122

40 Musk, E. *An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels*. *Journal of Medical Internet Research* (2019), 21(10), e16194.

41 Sender, E. *Elon Musk a testé son implant Neuralink sur des cochons*. *Sciences et Avenir* (2020). [https://www.sciencesetavenir.fr/sante/cerveau-et-psy/elon-musk-presente-son-implant-neuralink-sur-des-cochons\\_147095](https://www.sciencesetavenir.fr/sante/cerveau-et-psy/elon-musk-presente-son-implant-neuralink-sur-des-cochons_147095)

## FOCUS

### Exosquelette et intelligence artificielle

Un exosquelette est une armature mécanique motorisée, fixée sur un ou plusieurs membres du corps humain, dont l'objectif est, par exemple, de compenser une fonction absente ou déficitaire (permettre la marche à des patients tétraplégiques) ou d'assister une structure articulaire ou musculaire (augmenter les capacités de portage pour des applications militaires ou dans un contexte industriel).

En 2019, dans le cadre du projet Brain Computer Interface, Clinatec, centre de recherche biomédicale situé à Grenoble, a mis au point une neuroprothèse capable de contrôler un exosquelette par la pensée<sup>39</sup>. Cette neuroprothèse, testée sur un homme tétraplégique atteint d'une lésion de la moelle épinière, est dotée d'un dispositif implanté au niveau du cortex moteur et composé d'une matrice de 64 électrodes qui mesurent les signaux électriques émis par le cerveau lors d'une intention de mouvement. Ces signaux sont captés par un ordinateur qui, grâce à l'IA, est capable de les décoder et les renvoyer à l'exosquelette pour effectuer le mouvement «pensé».

# Chapitre 3 Neurotechnologies et usage non médical

De par la complexité, le coût, la taille ou l'invasivité (système implanté), certaines NT restent peu ou non « exportables » pour un usage hors encadrement médical ou de la recherche. Néanmoins, des outils non invasifs, mesurant l'activité cérébrale et collectant des données, connaissent une croissance considérable sur le marché mondial de l'utilisateur ciblant les troubles et les affections neurologiques (dépression, douleur...), le bien-être, le divertissement et l'éducation.

L'acceptabilité de ces avancées, dont l'intérêt en termes de prévention et de traitements s'avère évident dans un cadre médical, est conditionnée par le souci d'éviter tout risque de dérive, d'usage abusif ou de mésusage.

L'exploitation des NT hors du champ médical ou de la recherche, ouvre un infini champ des possibles d'applications, allant de l'exploitation des données cérébrales dans divers nouvelles « neurodisciplines » à une utilisation dans un but d'humain augmenté et, enfin, au contrôle des NT par la pensée.

### Une fenêtre sur les pensées

Le développement des procédés d'imagerie cérébrale a conduit à de larges applications au-delà du champ médical et de la recherche. Ces dernières décennies ont vu l'émergence de « neurodisciplines » qui vont parfois jusqu'à attribuer aux neurosciences le pouvoir de décrire l'être humain dans son individualité, sa subjectivité, ses actions, sa vie privée et sociale. Elles ont souvent pour objectif d'influencer, voire de maîtriser le processus de prise de décision de l'individu.

C'est le cas du neuromarketing qui a pour objectif de mieux comprendre, prédire ou modifier les émotions, choix, goûts, aversion et comportements des consommateurs. L'enregistrement de l'activité cérébrale lors d'un acte de choix ou d'achat, face à une publicité, une page internet, etc. et les données collectées permettraient de prédire les préférences d'un individu et donc de l'influencer<sup>42,43</sup>. La question se pose alors de la manipulation du consommateur et de l'intrusion dans son cerveau.

La France est un cas particulier pour cette neurodiscipline, car la loi de bioéthique de juillet 2011 interdit l'utilisation de l'imagerie cérébrale à des fins commerciales et limite donc la création d'entreprises spécialisées en neuromarketing. Cependant, des pays voisins comme la Belgique ou le Royaume-Uni, ou plus éloignés comme les États-Unis, ont un cadre légal moins contraignant<sup>44</sup>.

42 Rawnage, F. S., Rahman, K. M., Anwar, S. F., Vaidyanathan, R., Chau, T., Sarker, F. & Mamun, K. A. A. (2020). *Technological advancements and opportunities in Neuromarketing: a systematic review*. *Brain Informatics*, 7(1).

43 Russo, V., Ma, Q., Clement, J., Jin, J., Liu, T. & Zito, M. (2022). *Editorial : Neuromanagement and Neuromarketing*. *Frontiers in Psychology*, 13.

44 Wallez, S. W. 26 février 2015. *Neuromarketing : émoi, et moi ? écoconso*. <https://www.ecoconso.be/fr/Neuromarketing-emoi-etmoi>  
[Consulté le 18 février 2023]

Les entreprises françaises souhaitant mener des études sur le comportement des consommateurs par imagerie médicale, font appel à des entreprises étrangères pour réaliser leurs études. C'est par exemple le cas du site « Voyage-SNCF.com » qui a fait appel à une société de neuromarketing belge pour déterminer, par imagerie médicale, si l'évolution du site était acceptée par un panel d'internautes.

Un autre champ intéressant des neurodisciplines est la neurojustice. La neurojustice est la possibilité de recourir à l'imagerie cérébrale dans le cadre d'expertises judiciaires. Son application a conduit le gouvernement français à une prise de conscience de l'impact de cette neurodiscipline et la nécessité de l'encadrer. L'usage de l'imagerie fonctionnelle comme « détecteur de mensonges » est limité par la loi<sup>45</sup>.

En revanche, des images obtenues par IRMf ont été utilisées comme preuves pénales dans des centaines d'affaires aux États-Unis. En Inde, en 2008, un procès au cours duquel un électroencéphalogramme avait été utilisé comme détecteur de mensonge a fait scandale sur la scène internationale, puisque le résultat de cette utilisation avait conduit à la condamnation à la prison à vie d'une femme soupçonnée d'avoir empoisonné son fiancé, sentence finalement abandonnée<sup>46</sup>.

Autre champ de la neurojustice, l'utilisation des données d'IRMf explose, notamment aux États-Unis, pour l'étude des comportements dits « antisocial, agressif et criminel » dont l'objectif est de mettre au point de nouveaux traitements et des programmes de prévention de la délinquance<sup>47</sup>.

Une autre tendance est notamment l'analyse des données issues des NT pour décrire le cerveau humain dans des domaines tels que l'éducation et la politique (cf. Focus « Politique et neurosciences »).

## FOCUS

### Politique & neurosciences

La neuropolitique est l'intersection des neurosciences et des sciences politiques. Depuis une dizaine d'années, de nombreuses études ont été menées dans le but de corréliser les opinions, l'anatomie du cerveau et le fonctionnement cérébral. Des travaux récents montrent que des lésions ou la stimulation de certaines zones cérébrales peuvent jouer sur les jugements moraux qui sous-tendent les choix politiques<sup>48</sup>. Selon une étude réalisée en 2016 par une équipe de l'Institut des sciences cognitives de Londres, les opinions politiques seraient imprégnées dans notre cerveau. Cette étude, faite sur une centaine d'étudiants, a suggéré qu'au moins deux régions du cerveau avaient des tailles différentes selon l'orientation politique (gauche/droite). Ces régions pourraient devenir des « marqueurs » de bord politique<sup>49</sup>. Si ces recherches sont de plus en plus nombreuses, notamment aux États-Unis, la question se pose de leur utilisation pour manipuler l'opinion publique.

La neuroéducation est une discipline née de la rencontre des sciences cognitives et des sciences de l'éducation. Elle consiste à adapter au mieux les méthodes pédagogiques en utilisant les découvertes sur la mémoire, l'apprentissage, le langage, etc. pour informer les enseignants, scientifiques et parents sur les meilleures stratégies pour enseigner et apprendre. De l'expérimentation isolée au diplôme universitaire, de la salle de classe au laboratoire, en France, cet écosystème se structure progressivement mais reste peu appliqué dans les milieux éducatifs.

Il n'est pas sans soulever certaines inquiétudes sur son application chez l'enfant et l'adolescent dont les cerveaux, très plastiques, sont en développement. En Chine, comme l'a rapporté le Wall Street Journal en 2019, des expériences sont menées dans des écoles dans un but d'évaluer la concentration des élèves.

L'activité cérébrale est enregistrée grâce à un casque EEG et interprétée par une ICM donnant accès en temps réel à l'enseignant et aux parents aux données cérébrales relatifs à leur concentration. L'objectif étant de pouvoir établir des stratégies pédagogiques aidant l'enfant à se concentrer ou, inversement, permettant à l'enseignant de rendre la leçon plus attractive<sup>50</sup>.

45 Loi n° 2021-1017 du 2 août 2021 relative à la bioéthique. 2021-821. 29 juillet 2021. [En ligne]. [www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043884384/](http://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043884384/) [Consulté le 18 février 2023]

46 Marck M. (2012). L'IRM fonctionnelle : « Salut, je suis ton cerveau et je vais t'envoyer en prison ». L'Obs. [En ligne].

<https://www.nouvelobs.com/rue89/rue89-justice/20121006.RUE25751-irm-fonctionnelle-salut-je-suis-ton-cerveau-et-je-vas-tenvoyer-en-prison.html> [Consulté le 16 février 2023].

47 Garcia, M., Rouchy, E., Soulet, E., Meyer, R. & Michel, G. (2019). De la prévention précoce des conduites antisociales, agressives et délictueuses chez l'enfant et l'adolescent : une revue systématique des programmes d'intervention. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, 177(4), 371-378.

48 Schreiber, D. (2017). *Neuropolitics: Twenty years later. Politics and the Life Sciences*, 36(2), 114-131.

49 Chawke, C. et Kanai, R. (2016). *Alteration of Political Belief by Non-invasive Brain Stimulation. Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 1-31

50 Wang, Y., Hong, S. et Tai, C. *China's Efforts to Lead the Way in AI Start in Its Classrooms. (2019). The Wall Street Journal. SJ* [En ligne]. [www.wsj.com/articles/chinas-efforts-to-lead-the-way-in-ai-start-in-its-classrooms-11571958181](http://www.wsj.com/articles/chinas-efforts-to-lead-the-way-in-ai-start-in-its-classrooms-11571958181) [Consulté le 16 février 2023].

Ces expériences alertent sur les risques de dérive de telles pratiques. Au-delà de la contrainte morale et du sentiment d'oppression exercés par ces dispositifs sur la psychologie de l'enfant, ces applications donnent accès aux données cérébrales, données personnelles de l'enfant et seraient une intrusion de sa vie privée et son intimité. De plus, l'impact de tels dispositifs sur le cerveau en développement d'un enfant n'est à ce jour pas évalué.

Les données cérébrales sont aussi convoitées par plusieurs secteurs d'activités. La caractérisation de la personnalité d'un individu et de ses différents aspects, en analysant l'activité cérébrale, représente un potentiel attrayant pour le secteur de l'emploi. Les recruteurs pourraient ainsi identifier des individus avec des traits de personnalité particuliers correspondants aux postes proposés<sup>49,50,51</sup>. Ce mode de recrutement soulève ainsi de vives réflexions autour des notions de discrimination.

Un autre défi majeur est, dans le secteur de la sécurité, l'identification d'un individu. Ces dernières années, l'utilisation des paramètres biométriques tels que l'empreinte digitale, le visage, la voix, etc., ont été au cœur de ce domaine. Les casques de neuroimagerie permettraient d'accéder aux données cérébrales utilisées comme paramètre biométrique, paramètre propre à l'individu<sup>52</sup>. Ces développements remettent au centre du débat la notion de donnée cérébrale identifiante et, par conséquent, la protection de cette donnée et de l'individu, afin d'anticiper les éventuels usages non intentionnels et/ou abusifs.

## L'Humain augmenté : quand la neuroamélioration est détournée !

Cette dernière décennie, l'accessibilité et la portabilité de certaines NT basées sur la neuroamélioration cognitive ou physique ont considérablement attiré l'intérêt du secteur privé et des gouvernements, impliquant une large application pour un usage non médical. Sur le plan cognitif, la plupart des dispositifs non médicaux disponibles sont des casques EEG non invasifs, coûtant quelques centaines d'euros et généralement simplifiés, permettant une configuration facile par l'utilisateur. Ainsi, les domaines du bien-être, de la relaxation, de la méditation, de l'apprentissage, du sommeil, etc. ont vu l'apparition de nombreuses NT permettant à l'individu, grâce au principe du neurofeedback, de moduler son activité cérébrale<sup>53,54</sup>.

Par exemple, certains casques EEG promettent l'amélioration de la concentration et de l'attention. Ces dispositifs sont souvent couplés à des exercices mentaux qui sont effectués pendant que l'utilisateur porte le casque et qui permettent de stimuler les aires cérébrales associées à « l'état » que l'on souhaite modifier.

Bien que ces casques soient commercialisés comme des outils d'auto-assistance pour améliorer l'acuité mentale, ce type de technologie a suscité l'intérêt des éducateurs et des parents, comme évoqué dans les paragraphes sur la neuroéducation. Afin de mieux gérer la pression du quotidien, de nombreux casques EEG grand public sont également vendus pour aider l'utilisateur à gérer son stress, son sommeil, et son bien-être de façon générale<sup>55</sup>. L'efficacité de ces dispositifs reste peu démontrée.

Ces dispositifs sont peu encadrés juridiquement, sauf lorsqu'ils sont catégorisés comme dispositifs médicaux. Aux États-Unis, certains fabricants « omettent » de mentionner le nom des pathologies ou troubles cliniques associés, pour que le dispositif ne soit pas classé comme dispositif médical, et échapper ainsi à la surveillance de la FDA. Le dispositif est alors classé comme appareil de bien-être<sup>56,57</sup>.

Il existe également des NT non invasives de neurostimulation, facilement accessibles, pour des applications non médicales dont l'objectif n'est plus seulement de pallier un déficit, mais bien d'aller au-delà.

Des études ont montré que, dans certains cas, la stimulation transcrânienne électrique peut améliorer les performances cognitives et l'état émotionnel de personnes en bonne santé. Cette dernière décennie a vu l'apparition de dispositifs autoassemblés dits « Do It Yourself » destinés à être utilisés par des non-professionnels dans le but d'améliorer les fonctions cérébrales<sup>58</sup>. L'utilisation de ces dispositifs reste sujette à controverses en raison de par l'absence d'études montrant de réelles preuves de concept.

51 Zito, M., Bilucaglia, M., Fici, A., Gabrielli, G. et Russo, V. (2021). Job Assessment Through Bioelectrical Measures: A Neuromanagement Perspective. *Frontiers in Psychology*, 12, 1-33.

52 Benomar, M., Cao, S., Vishwanath, M., Vo, K. & Cao, H. (2022). Investigation of EEG-Based Biometric Identification Using State-of-the-Art Neural Architectures on a Real-Time Raspberry Pi-Based System. *Sensors*, 22(23), 9547.

53 La science derrière Melomind (2022). Melomind By my Brain Technologies. [En ligne]. [www.melomind.com/la-science-derriere-melomind/](http://www.melomind.com/la-science-derriere-melomind/) [Consulté le 16 février 2023].

54 Brandmeyer, T. & Delorme, A. (2013). Meditation and neurofeedback. *Frontiers in Psychology*, 4, 1-9.

55 Paek, A. Y., Brantley, J. A., Evans, B. J. & Contreras-Vidal, J. L. (2021). Concerns in the Blurred Divisions Between Medical and Consumer Neurotechnology. *IEEE Systems Journal*, 15(2), 3069-3080

56 Center for Devices and Radiological Health. General Wellness: Policy for Low Risk Devices. Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff (2019). U.S. Food and Drug Administration. [En ligne]. [www.fda.gov/regulatoryinformation/search-fda-guidance-documents/general-wellness-policy-low-risk-devices](http://www.fda.gov/regulatoryinformation/search-fda-guidance-documents/general-wellness-policy-low-risk-devices) [Consulté le 16 février 2023].

57 Center for Devices and Radiological Health. Overview of Device Regulation. (2020). U.S. Food and Drug Administration. [En ligne]. [www.fda.gov/medical-devices/device-advice-comprehensive-regulatory-assistance/overview-device-regulation](http://www.fda.gov/medical-devices/device-advice-comprehensive-regulatory-assistance/overview-device-regulation) [Consulté le 16 février 2023].

58 Erhardt, J. & Švob Štrac, D. (2016). New tools for neuroenhancement – what about neuroethics? *Croatian Medical Journal*, 57(4), 392-394.

Des sociétés privées, en Asie et aux États-Unis, proposent des casques de stimulation par courant continu qu'il est possible d'acheter sur internet, laissant croire au consommateur que la stimulation transcrânienne favoriserait la concentration ou la relaxation, alors même que l'innocuité de l'administration de courant continu n'a pas été évaluée à moyen et long terme<sup>59</sup>.

Les bénéfices d'utilisation de ces NT hors du champ médical ou de la recherche ne sont pas prouvés. Les conséquences de ces stimulations sont peu ou pas évaluées, elles portent un risque d'altération du fonctionnement normal du cerveau et de ses capacités de plasticité. En somme, le risque de porter atteinte à l'autonomie du patient en interférant avec ses pensées, ses émotions, son libre arbitre et son comportement.

Le secteur militaire s'intéresse de très près à la neuroamélioration physique. De nombreuses armées dans le monde investissent dans la notion de « soldat augmenté » qui permettrait d'améliorer et d'augmenter les capacités physiques naturelles du combattant par la science et la technologie.

Les États-Unis se sont ainsi positionnés comme la première puissance en matière de soldat augmenté. Leur vision à l'horizon 2030 est une armée convergeant vers l'utilisation des ICM et de l'IA sur le champ de bataille. Ainsi, la DARPA investit des sommes importantes dans le développement de « super soldats » n'ayant aucune limitation physique, physiologique ou cognitive (exosquelette, implant cérébral, bras robotisé super puissant, etc.)<sup>60,61</sup>.

En France, un comité d'éthique de la défense a été créé en 2020, rendant un premier avis sur le soldat augmenté. Celui-ci indique la possibilité d'envisager l'augmentation des soldats sous certaines conditions, notamment de ne pas recourir à des moyens invasifs touchants au corps du soldat<sup>62</sup>. Ces mouvements transhumanistes suscitent un débat sur la scène politique et publique.

## Contrôler les neurotechnologies par la pensée

De nombreuses entreprises privées s'intéressent également à la notion de contrôle par la pensée. Ainsi, ces dernières années ont vu l'émergence de dispositifs développés pour le jeu, le monde artistique (robe dynamique, composition musicale...), le domaine militaire ou encore juste pour augmenter les capacités cognitives naturelles d'un individu.

La notion de neurogaming, apparue il y a quelques années, regroupe les technologies offrant la capacité de contrôler la manette d'un jeu vidéo ou d'un jouet grâce à un casque EEG lié à une ICM<sup>63</sup>.

Dans le domaine militaire, la DARPA, mène des recherches sur le pilotage de drones par la pensée. Cette ICM a pour objectif de faciliter l'exécution de tâches complexes, mais également d'aider les pilotes à en effectuer plusieurs à la fois.

Si l'implant cérébral permet aujourd'hui d'utiliser une neuroprothèse avec fluidité, depuis quelques années les recherches s'orientent de plus en plus vers la conception d'un bras robotique piloté par la pensée. En 2019, une équipe de chercheurs américains a mis au point un dispositif couplé à une ICM permettant de contrôler un bras robotique par la pensée, sans implant cérébral. Cette NT a été testée sur presque 70 individus sains portant un casque muni de capteurs à ondes cérébrales. Les participants ont tous été capables de diriger le bras robotique de manière à pointer une cible mobile sur un écran<sup>64</sup>.

L'intérêt d'étendre les capacités d'un individu en bonne santé et la possibilité de contrôler son esprit posent de nombreuses questions d'ordre éthique, notamment sur les principes d'autonomie, de libre arbitre et de dignité humaine.

59 Wexler, A., Nagappan, A., Kopyto, D. & Choi, R. (2020). Neuroenhancement for Sale: Assessing the Website Claims of Neurofeedback Providers in the USA. *Journal of Cognitive Enhancement*, 4(4), 379-388.

60 Julienne, M. Super-soldats : l'humain augmenté en temps de guerre. *Polytechnique Insights* (2022). [www.polytechnique-insights.com/dossiers/science/travail-handicap-armee-la-revolution-de-lhumain-augmente/super-soldats-lhumain-augmente-en-temps-de-guerre/](http://www.polytechnique-insights.com/dossiers/science/travail-handicap-armee-la-revolution-de-lhumain-augmente/super-soldats-lhumain-augmente-en-temps-de-guerre/) [Consulté le 16 février 2023].

61 DARPA. (2019). Six Paths to the Nonsurgical Future of Brain-Machine Interfaces. (2019). [En ligne]. [www.darpa.mil/newsevents/2019-05-20](http://www.darpa.mil/newsevents/2019-05-20) [Consulté le 16 février 2023].

62 Ministère des armées (2020). Le Comité d'éthique de la défense - avis soldat augmenté. [www.defense.gouv.fr/comite-dethique-defense](http://www.defense.gouv.fr/comite-dethique-defense) [Consulté le 16 février 2023].

63 Bisbal G. (2019). Neurogaming : jouer avec le cerveau. Nos Pensées. <https://nospensees.fr/neurogaming-jouer-avec-le-cerveau/> [Consulté le 16 février 2023].

64 Penalzoza, C. I. & Nishio, S. (2018). BMI control of a third arm for multitasking. *Science Robotics*, 3(20).

# Chapitre 4

## Enjeux éthiques et sociétaux, notion de neuroéthique

Alors que la société devient de plus en plus consciente de la prévalence des troubles neurologiques et neuropsychiatriques, les progrès réalisés dans le domaine des NT suscitent des espoirs grandissants mais inconsidérés dans la population.

Les effets indésirables de certaines techniques sur le cerveau, parfois intrusives, ainsi que leur usage dans des domaines autres que la médecine ou la recherche sont controversés et soulèvent de nombreux questionnements éthiques. L'anticipation des conséquences et de l'impact sociétal de la recherche en neurosciences et du développement des NT sont au cœur des préoccupations de la communauté bioéthique.

De nombreux rapports et ouvrages soulignent un niveau d'incertitude élevé concernant les bienfaits et les risques de leur utilisation, ainsi que la nécessité d'entamer des réflexions plus globales sur l'incidence de ces avancées impliquant des valeurs référentes de la bioéthique<sup>65,66,67,68,69</sup>.

### Des modifications physiques et psychiques possibles

Dans le rapport du CIB de l'UNESCO, plusieurs notions éthiques sont pointées du doigt, notamment la nécessité de préserver l'intégrité cérébrale et la dignité humaine de l'individu face à la possibilité qu'offre les NT de moduler/modifier le cerveau. L'utilisation des ICM ou de dispositifs invasifs serait susceptible d'altérer l'identité personnelle et l'authenticité du soi du patient/utilisateur en modifiant la prise de décision ou le comportement. Le fait de toucher au cerveau avec des implants et des stimulations électriques ou magnétiques, même à travers le crâne, présente un risque non négligeable de provoquer des courants épileptiques qui peuvent détériorer les neurones. Les NT peuvent non seulement altérer les capacités cognitives d'un individu, mais également ses émotions, ses compétences sociales et même ses capacités physiques. Ainsi, la notion d'autonomie devient centrale dans l'utilisation des NT, notamment pour ce qui concerne l'influence de ces technologies sur la capacité d'un individu à prendre une décision et pour ce qui concerne l'utilisation, le traitement et le partage des données cérébrales personnelles acquises à des fins diverses. Des procédures de consentement libre et éclairé, solides et adaptées au contexte, apparaissent indispensables pour apporter des garanties au patient/utilisateur.

### Fragilisation de la vie privée risque de discrimination et accentuation des inégalités.

La vie privée et la confidentialité des données cérébrales collectées par les NT, particulièrement sous format numérique, ouvrent un large spectre de questionnements quant à leur stockage et leur utilisation dans un but discriminatoire ou malveillant. La donnée cérébrale constitue une donnée personnelle pouvant identifier une personne, un état émotionnel (joie, tristesse, peur...), une opinion politique, une orientation sexuelle ou encore un état de santé neurologique (dépression, addiction...). De ce fait, il est important de protéger la donnée cérébrale contre tout mésusage. Par exemple, les algorithmes au sens large qui sont fondés pour la plupart sur une moyenne ou une norme, peuvent classer les individus en différents groupes (sexe, ethnie, religion, etc.) et par conséquent renforcer les stigmatisations, les préjugés et les biais, ce qui est susceptible d'entraîner des discriminations et d'accroître la vulnérabilité de ces individus et de ces groupes.

65 OCDE. (Recommandation sur l'innovation responsable dans le domaine des neurotechnologies. Instruments juridiques de l'OCDE, 11p. [En ligne]. [www.oecd.org/fr/science/recommandation-innovation-responsable-dans-le-domaine-des-neurotechnologies.html](http://www.oecd.org/fr/science/recommandation-innovation-responsable-dans-le-domaine-des-neurotechnologies.html) [Consulté le 16 février 2023].

66 Hetzel P. (2022). Note n° 32 : Les neurotechnologies : défis scientifiques et éthiques. Sénat, 11p. [En ligne]. [www.senat.fr/opepst/notes.html](http://www.senat.fr/opepst/notes.html) [Consulté le 16 février 2023].

67 Roure F. (2021). Neurotechnologies et innovation responsable. Réalités Industrielles, 85p. [En ligne]. [www.annales.org/ri/2021/ri\\_aout\\_2021.html](http://www.annales.org/ri/2021/ri_aout_2021.html) [Consulté le 16 février 2023].

68 Avis n° 122 du Comité Consultatif National d'Éthique pour les Sciences de la Vie et de la Santé « Recours aux techniques biomédicales en vue de « neuro-amélioration » chez la personne non malade : enjeux éthiques ». CCNE (2013). <http://affairesjuridiques.aphp.fr/textes/avis-n-122-du-comite-consultatif-national-dethique-pour-les-sciences-de-la-vie-et-de-la-sante-recours-aux-techniques-biomedicales-en-vue-de-neuro-amelioration-chez-la-pers/>

69 CCNE. (2018). Révision de la loi relative à la bioéthique : les principales propositions du CCNE - Avis 129. 156p. [En ligne]. [https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2021-02/avis\\_129\\_vf.pdf](https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2021-02/avis_129_vf.pdf) [Consulté le 16 février 2023].

De même, la problématique de la cybersécurité, avec l'utilisation non autorisée ou coercitive des données cérébrales à des fins malveillantes ou abusives, constitue également de sérieux questionnements, notamment quand ces données ne sont pas considérées comme données de santé ou personnelles, donc et ne relevant pas de juridictions ayant adopté le RGPD.

L'émergence d'un monde où le cerveau humain serait connecté aux technologies d'apprentissage machine et aurait accès à des données illimitées, pose question. L'accès à ces données considérées comme intimes et privées pourraient être convoitées par des entreprises à des fins inappropriées soulevant des questions relatives au respect de la vie privée.

Enfin, le coût conséquent des NT soulève les problématiques d'équité d'accès et de justice sociale, les limitant à certains patients/utilisateurs privilégiés. Le marché mondial de la santé dépendra fortement de la volonté et de la capacité des organismes d'assurance maladie publics et privés de rembourser aux patients le coût de ces dispositifs. Il conviendrait d'en assurer une équité d'accès comme cela a été fait en France pour l'implantation d'électrodes de stimulation cérébrale profonde dans la maladie de Parkinson.

### **La question du transhumanisme**

Les dispositifs développés dans le but d'améliorer les capacités cognitives d'un individu dans certaines pathologies, ou d'en améliorer la qualité de vie, pourraient servir à augmenter les capacités d'un individu sain.

Les NT de neuroamélioration invitent à la réflexion sur la manière dont elles seront utilisées et sur le respect de principes éthiques fondamentaux tels que la dignité humaine, l'autonomie ou encore la justice sociale.

De même, les progrès des NT et leur couplage avec l'IA conduisent à s'interroger sur les problèmes éthiques que pourraient engendrer un futur avec une intelligence et des capacités cognitives humaines sans précédent. Cette notion de dépassement des limites de la nature, ou transhumanisme, pourrait, à terme, engendrer l'émergence d'une catégorie d'individus augmentés.

En plus des questionnements importants soulevés par le transhumanisme, cette situation entraînerait inévitablement une fracture sociale entre ceux qui pourraient bénéficier de ces techniques et ceux qui ne pourraient pas y avoir accès.

## **Chapitre 5**

# **Vers la naissance des neurodroits**

L'acceptabilité des avancées dans le domaine des NT, dont l'intérêt en termes de prévention et de traitements est avéré, est conditionnée par le souci d'éviter tout risque de dérive ou d'usage inconsidéré, faute d'un encadrement approprié. Ces dernières années, les défis éthiques soulevés par ces NT ont engendré une mobilisation internationale.

### **Sur la scène internationale**

Le conseil de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) a adopté en décembre 2019, dans sa recommandation 457, neuf principes en vue d'encadrer le développement responsable de l'innovation des NT.

Cette recommandation, première norme internationale dans le domaine, constitue un instrument juridique non contraignant, mais impliquant une obligation morale des États membres, telle la France, à la mettre en application. Dans son texte, l'OCDE reconnaît la nécessité de protéger les données cérébrales collectées et d'anticiper/surveiller les éventuels usages non intentionnels et/ou abusifs des NT, et également de promouvoir une innovation responsable.

Dans le rapport du CIB de l'UNESCO évoqué précédemment, le comité appelait à la nécessité de mettre en place un nouvel ensemble de neurodroits qui reposeraient sur la reconnaissance des droits fondamentaux de tous les individus.

Ces neurodroits devraient accorder une attention particulière aux enfants et adolescents dont la plasticité cérébrale est très active, à l'intégrité physique et mentale, à l'intimité mentale, à la liberté de penser et au libre arbitre, ainsi qu'au droit de bénéficier des avantages du progrès scientifique en termes de NT.

Ces « neurolois » permettraient à l'individu de décider librement et de manière responsable des questions liées à l'utilisation de ces dispositifs, sans aucune forme de discrimination, de coercition et de violence.

Ce rapport mentionne également que l'UNESCO invitera, par le biais d'une convention universelle, les gouvernements à établir un cadre juridique spécifique pour l'application des neurodroits et la formulation de sanctions en cas de non-respect.

Face à la multiplication des débats dans le domaine, à l'automne 2021, le Chili est devenu le premier pays au monde à légiférer sur les NT, et a adopté à l'unanimité un projet de loi modifiant la Constitution pour protéger les droits du cerveau et donnant le



statut d'organe aux données cérébrales personnelles. La loi a été promue en octobre 2021, protégeant les données cérébrales, l'intégrité mentale, le libre arbitre et la non-discrimination dans l'accès des citoyens aux NT<sup>70</sup>.

## Et au niveau national ?

En France, plusieurs initiatives ont vu le jour dans le but de protéger les individus face au développement rapide de ces NT.

En 2013 et 2018, le Comité consultatif national d'éthique (CCNE) a rendu deux avis sur certains aspects des NT. L'un concernait la nécessité d'engager une réflexion éthique sur le recours aux techniques biomédicales en vue d'une neuroamélioration chez la personne non malade et l'autre, en marge de la révision de la loi de bioéthique de 2021, formulait un avis défavorable au recours à l'IRMf dans le cadre judiciaire.

Ainsi dans la loi de bioéthique d'août 2021, trois articles traitent de façon directe ou indirecte le domaine des NT.

- 1) L'article 11, aborde l'IA en santé et permet de sécuriser la bonne information du patient lorsqu'un traitement algorithmique de données massives est utilisé à l'occasion d'un acte de soins. Cet article ne mentionne pas précisément les NT et les données cérébrales qu'elles génèrent.
- 2) L'article 12 encadre quant à lui les techniques d'imagerie cérébrale (cadre médical ou judiciaire).
- 3) Enfin, l'article 13 donne le droit au ministre chargé de la santé d'interdire tout dispositif de neuromodulation qui présenterait un danger grave ou une suspicion de danger grave pour la santé humaine. Ces articles constituent un encadrement législatif limité ne couvrant pas tout le spectre du domaine des NT, notamment leur usage hors champ médical.

Dans une note scientifique parue en janvier 2022, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) recommande la mise en place d'un encadrement de l'innovation en NT et appelle à définir un cadre juridique protecteur ne décourageant pas la recherche française et favorisant le développement de cet écosystème.

Enfin, le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) a missionné un groupe de travail (*task force*) dont le but premier était d'informer les parties prenantes de l'existence des recommandations de l'OCDE.

Cette *task force* comprend différents acteurs du domaine des NT, à savoir des représentants des ministères et d'institutions publiques, des experts scientifiques et de la bioéthique, des représentants de l'industrie et des professionnels de santé.

À l'issue de deux années de travail, une charte de développement responsable des neurotechnologies, co-construite par ces différents acteurs, a été lancée en novembre 2022. Aux termes de cette charte, formulés selon cinq grands engagements, les signataires reconnaissent « *aux patients et aux utilisateurs, potentiels ou avérés, le droit à préserver leur identité humaine, leur liberté de penser, leur autonomie, leur liberté cognitive, leur vie privée mentale, le droit de s'opposer à une utilisation non consentie ou abusive de leurs données cérébrales personnelles et de refuser toute manipulation non consentie ou abusive de leur cerveau* »<sup>71</sup>

Même si la charte n'est pas juridiquement contraignante, elle constitue pour les signataires un engagement moral important à respecter des bonnes pratiques et un acte de confiance envers le patient/consommateur. Elle concrétise l'important premier pas d'un encadrement des NT en France.

70 Guzman L. (2022). *Le Chili, pionnier dans la protection des « neurodroits »*. UNESCO. [En ligne]. <https://fr.unesco.org/courier/2022-1/chili-pionnier-protection-neurodroits> [Consulté le 16 février 2023].

71 Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation. (2022). *Charte de développement responsable des neurotechnologies*. 3p [En ligne]. [www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/charte-de-developpement-responsable-des-neurotechnologies-87964](http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/charte-de-developpement-responsable-des-neurotechnologies-87964) [Consulté le 16 février 2023].

# En bref

« Il peut sembler inconfortable voire risqué de redéfinir les limites de son propre univers. Mais peut-être est-ce encore plus risqué de renoncer et de ne pas essayer de découvrir la vraie saveur de la vie ».

Les réflexions de l'explorateur norvégien Erling Kagge ne s'appliquent pas qu'aux voyages polaires. L'exploration du cerveau et l'essor des neurotechnologies ont remplacé l'appel du large chez ces grands aventuriers que sont les scientifiques. N'est-ce que le désir aristotélicien (le désir est l'unique force motrice), ou son interprétation managériale spinosiste (le désir est l'essence même de l'Humain), qui entraînent les êtres humains vers l'amélioration de leurs connaissances ? Probablement pas, le fantasme de l'humain augmenté, avatar de l'humain amélioré, faisant souvent rêver d'une nouvelle abondance. Les chemins de la science et de la politique ne sont pas parallèles et se croisent souvent.

Le domaine des NT ne fait pas exception. Il est en plein essor, et a déjà permis le développement de nombreux traitements novateurs, source d'espoirs pour les malades, d'enthousiasme pour les médecins et de motivation pour les chercheurs.

De nombreuses questions restent cependant en suspens en ce qui concerne les impacts collatéraux à moyen et long terme, les usages malveillants ou abusifs. La transformation du cerveau humain touche à notre humanité. C'est cette transformation, à la fois source d'espoir pour les malades et de controverses commerciales, qui soulève les questionnements éthiques, juridiques et sociaux dont nous avons esquissé les contours dans ce premier bulletin.

La loi du 2 août 2021 a mis l'anticipation des conséquences et de l'impact sociétal de la recherche en neurosciences et du développement des NT au cœur de vos débats. Nous alimenterons régulièrement votre réflexion, afin d'éclairer au mieux le cadre du progrès, cadre qui permettra de définir les limites de l'intervention technologique sur l'humain, sans altérer l'économie de la connaissance dans ce domaine qui ne cesse d'évoluer. Après ce premier bulletin sur les neurotechnologies, nous vous donnons rendez-vous pour le deuxième numéro qui traitera des liens et interfaces entre l'intelligence artificielle (IA) et les neurosciences.

# Glossaire

**Activité cérébrale.** Désigne les échanges électrochimiques entre les milliards de cellules du cerveau, les neurones. Ces échanges sont mesurés par différentes techniques de neuroimagerie et caractérisent l'état physiologique et psychologique d'un individu.

**Apprentissage machine.** Champ d'étude de l'intelligence artificielle qui se fonde sur des approches informatiques, mathématiques et statistiques. Il utilise principalement des données et des algorithmes pour donner la capacité aux machines d'apprendre et d'imiter la manière dont les êtres humains apprennent.

**Biomarqueurs cérébraux.** Mesurés grâce aux techniques de neuroimagerie, ils constituent des signatures cérébrales reflétant certaines caractéristiques biologiques spécifiques à une pathologie.

**Données cérébrales.** Ensemble des données enregistrées à partir du cerveau d'un individu. Elles peuvent être enregistrées directement grâce aux techniques de neuroimagerie ou indirectement par l'intermédiaire d'une interface cerveau-machine.

**Exosquelette.** Appareillage motorisé et fixé sur un ou plusieurs membres du corps humain qui compense une fonction absente ou déficiente, assiste une structure articulaire ou musculaire ou stabilise et corrige l'action d'un segment corporel pendant une phase de réadaptation.

**Humain augmenté.** Processus d'augmentation positive de nos capacités, de façon permanente ou temporaire. Cela inclut toute technologie qui étend ou modifie positivement nos capacités ou notre apparence : médicaments, hormones, implants, génie génétique ou certaines interventions chirurgicales.

**Imagerie cérébrale ou neuroimagerie.** Ensemble des techniques d'imagerie médicale qui permettent d'obtenir des images ou des représentations visuelles des structures anatomiques du cerveau ou de son fonctionnement.

**Implant cérébral.** Dispositif implanté dans le cerveau afin de lire ou contrôler des signaux cérébraux. Ce dispositif artificiel permet notamment de proposer une solution de suppléance dans le cas de fonctions perdues.

**Implant cochléaire.** Dispositif médical électronique destiné à corriger l'audition de personnes souffrant de surdités de perception sévères et profondes. Ce dispositif consiste à créer une cochlée « virtuelle » en implantant une sonde qui envoie des signaux électriques, interprétables par le cerveau, directement au nerf auditif. Cela implique une intervention chirurgicale ainsi qu'un suivi postopératoire pour la rééducation et les réglages.

**Intelligence artificielle.** Processus d'imitation de l'intelligence humaine qui repose sur la création et l'application d'algorithmes exécutés dans un environnement informatique dynamique. Son but est de permettre à des ordinateurs de penser et d'agir comme des êtres humains.

**Interface cerveau-machine.** Système informatique qui acquiert les signaux cérébraux, les analyse et les traduit en commande qui sont relayées à un dispositif de sortie pour effectuer une action souhaitée.

**Neurodroits.** Ils peuvent être définis comme « les principes éthiques, juridiques, sociaux ou naturels de liberté ou de droit liés au domaine cérébral et mental d'une personne », c'est-à-dire les règles normatives fondamentales pour la protection et la préservation du cerveau et de l'esprit humain.

**Neuroéducation.** Discipline née de la rencontre des sciences cognitives et des sciences de l'éducation. Elle cherche à optimiser les méthodes pédagogiques en fonction de l'activité normale, spontanée du cerveau.

**Neurofeedback.** Pratique d'entraînement cérébral au cours de laquelle l'activité cérébrale d'un individu est mesurée et lui est présentée en temps réel sous différentes formes : son, image, etc. Le but de cette méthode est que l'individu arrive à autoréguler son activité neuronale supposée sous-tendre un comportement ou une pathologie spécifique.

**Neurojustice.** Applications des neurosciences et de l'imagerie cérébrale dans le domaine judiciaire, plus particulièrement en matière pénale.

**Neuromarketing.** Étude de l'activité cérébrale mais également analyse du comportement facial (expressions du visage, *eye tracking* et tous les indicateurs plus ou moins directement liés au système nerveux) susceptibles d'intervenir dans le comportement des consommateurs. Ce domaine a pour objectif de mieux comprendre, prédire ou modifier les émotions, choix, goûts, aversion et comportements des consommateurs.

**Neuroprothèse.** Dispositif électronique ou électromécanique permettant de remplacer une fonction motrice, sensorielle ou cognitive altérée.

**Neuroréhabilitation.** Processus médical qui vise à activer des connexions entre les neurones pour faciliter la récupération d'une lésion du système nerveux, et à minimiser et/ou compenser les altérations fonctionnelles qui en résultent.

**Plasticité neuronale.** Elle s'exprime par la capacité du cerveau de créer, défaire ou réorganiser les réseaux de neurones et les connexions de ces neurones tout au long de la vie. Le cerveau est ainsi qualifié de « plastique » ou de « malléable ».

**Stimulation cérébrale profonde.** Technique chirurgicale invasive basée sur la modulation électrique de circuits neuronaux. Des électrodes sont implantées dans des zones spécifiques du cerveau et permettent, par des impulsions électriques, de contrôler l'activité anormale du cerveau liée à certaines pathologies.