

# Introduction

Par Laure TABOUY

Université de Paris Saclay – Espace éthique de l'APHP, Faculté de médecine,  
ParisDigital & Ethics Biotech, Paris

Et Françoise ROURE

Chercheur associé au Laboratoire CETCOPRA, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne  
Présidente de la section Sécurité et Risques du Conseil général de l'Économie

**D**e nouvelles neurotechnologies se déploient désormais dans un paysage d'innovation où la diffusion du numérique a ouvert sur une véritable transformation civilisationnelle, avec des défis culturels, sociétaux et humains qui font osciller nos contemporains entre craintes et une certaine promesse ou espérance liée à leurs usages. Leur arrivée sur le marché, qu'il s'agisse d'applications médicales ou de nature commerciale, nous font avancer à marche forcée vers ces interrogations sur l'humain et sur le monde que nous désirons esquisser.

Ces neurotechnologies, dont le développement est lié à l'essor des neurosciences – lesquelles sont nées de la convergence des approches moléculaire et cellulaire avec des recherches plus intégrées –, permettent d'observer le cerveau sans l'endommager et de pratiquer certaines interventions avec une grande précision. Elles mettent en jeu la conception que nous nous faisons de nous-mêmes en tant que personnes responsables disposant d'un libre arbitre, et bouleversent la compréhension des comportements quotidiens.

L'OCDE a défini les neurotechnologies comme les dispositifs et les procédures utilisés pour accéder au fonctionnement ou à la structure des systèmes neuronaux de personnes naturelles et permettant de les étudier, de les évaluer, de les modéliser, d'exercer sur eux une surveillance ou d'intervenir sur leur activité<sup>(1)</sup>. Les neurotechnologies sont exceptionnelles du fait de la relation étroite existant entre le cerveau et les capacités cognitives propres à l'identité humaine, l'agentivité<sup>(2)</sup> en tant que prérequis à toute considération éthique, et de la capacité singulière de la personne humaine de rendre compte, c'est-à-dire d'assumer une responsabilité. L'utilisation des neurotechnologies, couplées ou non à l'IA et au *machine learning*, et de la neuro-imagerie permet d'acquérir de nouvelles connaissances et d'avoir une vraie portée clinique, en facilitant les diagnostics, en agissant directement sur le cerveau pour le réparer ou en créant de nouveaux circuits de neurones venant prendre le relais des circuits défaillants.

Elles représentent également des techniques de modification des fonctions cérébrales à l'interface entre le cerveau et la machine pour visualiser, décrypter et moduler le fonctionnement cérébral et les dysfonctionnements pathologiques, par le biais d'électrodes, d'EEG, de stimulations cérébrales profondes, transcrâniennes, ou de molécules chimiques. Elles ouvrent de nouveaux accès aux mécanismes fondamentaux qui sous-tendent l'identification humaine, les souvenirs, les émotions, la personnalité... Le champ des possibles s'enrichit au fur et à mesure de l'avancée de recherches qui permettent de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau, la façon de stimuler ou de modifier les perceptions sensorielles ou encore de modifier le comportement humain à des fins thérapeutiques ou de confort du patient, ou en poursuivant d'autres finalités.

Les avancées faites dans les neurosciences permettent à de nouvelles neurotechnologies d'arriver sur le marché, et les applications sont nombreuses. Pour le grand public, ces techniques ouvrent la voie à la lecture du cerveau et à l'écriture dans celui-ci. Et même si ces techniques sont physiquement non invasives (absence d'implants), elles sont de nature à remettre en cause l'intégrité mentale même si des bénéfices en sont attendus, voire plébiscités par certains individus ou groupes d'individus (pratique du sport de haut niveau, recherche de la performance compétitive, augmentation des capacités mentales combinatoires et d'abstraction et, d'une manière générale, des capacités cognitives, c'est-à-dire qui permettent l'acquisition de connaissances).

Les nouvelles neurotechnologies augmentées par les apports multidisciplinaires donnent accès à des *monitorings* beaucoup plus personnalisés et plus intimes, avec des promesses mais aussi des menaces potentielles pesant sur l'indisponibilité vis-à-vis d'autrui des personnes dans toutes leurs composantes humaines (corps, personnalité...). Plus la technologie s'insère dans l'intimité du cerveau, et plus croissent les dangers de mésusage, par erreur ou de façon délibérée. Les neurotechnologies, multiples et souvent encore expérimentales, arrivent dans notre vie quotidienne sans que les chercheurs aient eu le temps de s'assurer que ces neurotechnologies sont adaptées à une vie hors des laboratoires de recherche.

(1) OECD/LEGAL/0449, Recommandation du Conseil sur l'intelligence artificielle, <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0449>

(2) L'agentivité, ou *agency*, peut être définie comme la capacité d'agir, la faculté d'action d'un être par opposition à ce qu'impose son environnement (structure de travail...).

Plus les promesses deviennent attractives et s'adressent au public, plus l'exposition aux dangers s'élève. La neuro-sécurité, voire la neuro-sûreté, sont devenues un enjeu considérable, ce qui justifie le fait que la loi française sur la bio-éthique revisite régulièrement le cadre réglementaire dans lequel les développements des neurotechnologies s'inscrivent, en relation avec le cadre fixé par l'Union européenne pour les dispositifs médicaux. Le *brainjacking*, via les technologies numériques et des applications mobiles actuellement à l'étude et possiblement par le biais de divers implants, soulève des questions sur les garanties apportées en termes de protection efficace de la personne, notamment en procédant à un enregistrement et en instaurant un usage autorisé de ses données cérébrales (Minielly *et al.*, 2020). Quand ces neurotechnologies proposent une solution, d'adopter un comportement, quand elles influencent ce dernier pour en changer, elles produisent des injonctions douces, elles servent de supports au *nudge* dont la finalité est d'obtenir une réorientation dans l'axe souhaité par son promoteur, sans faire preuve d'autorité ni d'une domination violente apparente, mais en court-circuitant le ressenti de la personne. Cette pratique pose la question du consentement éclairé, et du cadre normatif en vigueur : obligation ou non d'informer l'utilisateur, existence ou non de garanties en matière de liberté individuelle et collective, de penser, de conscience... des garanties discutées autour du concept émergent de neurodroits. Vient également se greffer une question sous-jacente, celle de savoir : qui, en cas de dommages ou de griefs, portera la responsabilité de l'utilisation de ces neurotechnologies ?

L'innovation responsable en neurotechnologies requiert un temps de réflexion et de délibération pour que sa mise en société soit sûre et respectueuse des valeurs universelles de dignité, d'autonomie, de liberté de penser et de choix, en appui sur l'engagement volontaire des acteurs pour en assurer la réussite. Les développements récents issus de la convergence de technologies émergentes se traduisent par une accélération de l'innovation en matière d'application des neurosciences et des neurotechnologies dans le domaine de la santé, via des dispositifs médicaux, mais aussi dans le domaine du bien-être ou de celui de la performance, avec la commercialisation de dispositifs, médicaux ou non, professionnels ou grand public, qui viennent concrétiser certaines promesses.

En ces temps de crise sanitaire, le rapport des êtres humains à leur environnement a indéniablement changé. L'instauration du télétravail, l'isolement social, la distance corporelle, l'expression partiellement cachée du visage qui rend plus difficile le décryptage des émotions, l'impossibilité de planifier l'avenir sur le long terme, l'effacement de la frontière entre vie privée et vie professionnelle, ce sont là autant d'éléments qui bouleversent nos relations sociales et nos habitudes de vie.

Au-delà du ressenti, la santé publique et le bien-être des populations sont mis à rude épreuve par la pandémie mondiale induite par la diffusion du virus Sars-Cov-2, avec des conséquences économiques de portée inédite pour la production et les échanges dans un monde industriel dont les chaînes d'approvisionnement et de valeur ont été globalisées. En matière de santé, de bien-être et de performances mentales, l'impact négatif du Sars-Cov-2 et de ses variants sur l'état du système nerveux est d'ores et déjà documenté par des analyses scientifiques, avec une statistique de 33,62 % de séquelles neurologiques, qu'il s'agisse de troubles psychologiques ou psychiatriques, ou de défaillances biologiques (AVC, notamment)<sup>(3)</sup>, parmi les personnes ayant survécu à cette maladie, sur une cohorte de plus de 236 000 patients diagnostiqués Covid-19.

Avant cette pandémie mondiale, la perte économique liée aux maladies mentales, dont Alzheimer et Parkinson, avait été estimée à 16,6 trillions d'USD à l'horizon 2030<sup>(4)</sup>. Les coûts économiques des atteintes neurologiques affectant les populations en tant que séquelles du Sars-Cov-2 (désignées parfois sous le terme de Covid-19 long) n'ont pas été estimés à ce stade, mais ne pourront, sauf considération de la gravité de la situation et des mesures exceptionnelles prises, qu'accroître fortement et dans la durée le montant de ces pertes. Santé publique France a pris la mesure de cette situation inédite et recense les modifications et les innovations organisationnelles à apporter à très court terme dans les systèmes de soins hospitaliers ou non suite à l'émergence de ces séquelles.

Les offres de dispositifs neurotechnologiques et leurs services associés pour tenter de ralentir, de pallier, de redonner un peu de confort si ce n'est de guérir les patients atteints de troubles mentaux vont connaître un essor certain pour faire face à des besoins en forte croissance. Le marché mondial des dispositifs médicaux issus des neurosciences était estimé en 2020 à 16 milliards de dollars, avec des régulations de mise sur le marché qui varient selon les pays. Du point de vue des politiques publiques, la solution de long terme est la prévention, pour éviter d'atteindre un point de rupture des systèmes de santé, en termes de capacité, d'infrastructures et de qualifications, mais aussi en matière budgétaire.

Là où prédominait historiquement la relation soignant-patient, dans un dialogue singulier adapté et régulé par des normes éthiques professionnelles (dont les serments d'Hippocrate et de Galien sont des exemples génériques, des piliers de l'Ordre des médecins et de celui des pharmaciens en France), s'insèrent désormais, avec la numérisation des données, des offres industrielles dont l'environnement de confiance (certification, normes, autorisations) est non seulement émergent mais également complexe étant donné l'hétérogénéité de leurs composants. Il s'agit notamment de l'intelligence artificielle et de ses algorithmes, dont la question de la transparence est en délibération, de la capture de données relatives à l'activité cérébrale (lire le cerveau) ou de l'utilisation d'ondes acoustiques et électromagnétiques à des fins de neuromo-

(3) TAQUET Maxime, GEDDES John R., HUSAIN Masud, LUCIANO Sierra & HARRISON Paul J. (2021), "6-month neurological and psychiatric outcomes in 236379 survivors of Covid-19: a retrospective cohort study using electronic health records", *Lancet Psychiatry*, April 6, [https://doi.org/10.1016/S2215-0366\(21\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S2215-0366(21)00084-5)

(4) TRAUTMANN S., REHM J. & WITTCHEM H. (2016), "The economic costs of mental disorders: Do our societies react appropriately to the burden of mental disorders?", *EMBO reports*, vol. 17/9, pp. 1245-1249, <http://dx.doi.org/10.15252/embr.201642951>

dulation, dont les usages répondent à des critères d'évaluation de sécurité et de sûreté différents, lorsqu'ils existent, de ceux des EEG classiques, par exemple.

Au-delà des agents physiques utilisés par les neurotechnologies pour agir sur le cerveau, la crise sanitaire a un double effet, à la fois de révélateur et d'accélérateur, sur le marché des interfaces cerveau-machine (ICM) dont les finalités commerciales sont promues autour de méthodes de *coaching* personnalisées pour une meilleure gestion du stress, l'amélioration de la concentration, de l'attention, de la motivation, etc. Définies généralement comme un dispositif enregistrant l'activité cérébrale en vue d'agir en temps réel par le biais de dispositifs dits de *neurofeedback*, ces interfaces dévoilent à ceux qui en sont équipés les signaux cérébraux correspondant à leur état émotionnel ou cognitif, et ce, en vue d'un *monitoring* : mieux se concentrer, faire une pause, se relaxer, se motiver, etc. Sans exercer la moindre coercition, ces interfaces intègrent donc à leur manière la logique du *nudge* pour orienter les conduites des individus en vantant, au-delà du bien-être, l'accès à des performances inégalées, par exemple dans les domaines hyper compétitifs que sont le sport ou la sélection dans les systèmes de formation.

Si l'innovation neurotechnologique est appelée à prendre toute sa place dans l'évolution des offres de prévention, il convient d'être lucide quant aux dérives potentielles pressenties, dès lors que l'application au domaine commercial des neurosciences et des neurotechnologies porterait des promesses de nature à remettre en cause les solidarités, à porter atteinte à la dignité et à l'autonomie des personnes, à consolider hors de la sphère médicale l'acceptation de dispositifs de surveillance voire de manipulation mentale associés à des objectifs non démocratiques. L'éthique par construction en matière de neurotechnologies, ou neuro-éthique, mérite d'être explicitée et mise en œuvre<sup>(5,6,7,8,9)</sup>, quelles que soient les cultures et dans le respect de leur diversité, dès lors que les fondamentaux intrinsèquement liés à l'être humain restent du domaine du sacré, dans son acception laïque. C'est sans doute la condition *sine qua non* d'une innovation responsable.

Les réflexions éthiques et épistémologiques liées aux neurotechnologies s'expriment en général par le biais de questionnements, d'intuitions... Réfléchir sur les enjeux éthiques nécessite de s'interroger, de s'ouvrir à la démarche de questionnement sur les valeurs et les finalités, les principes et les normes, les contextes et les conséquences de nos actions à des moments où ces dernières sont en tension, ambiguës ou en conflit avec notre environnement. Une telle réflexion, essentielle à l'innovation responsable, permet alors de poser factuellement les choses. La neuro-éthique, qui se place à l'intersection entre les sciences humaines et les neurosciences et qui invite à discerner entre ce qui – dans les transformations engendrées par les neurotechnologies – est souhaitable et ce qui l'est moins, incarne l'approche pluridisciplinaire indispensable à toute innovation responsable. Elle demande à ce l'on comprenne comment les connaissances et les recherches sur les neurotechnologies peuvent affecter le futur de la société. En somme, il s'agit d'appeler à une pratique neuroscientifique plus réfléchie, confortée par les sciences sociales, pour examiner le potentiel et les limites des questions et des méthodologies des neurosciences et de leurs impacts sur la société<sup>(10,11,12)</sup>.

Afin d'éclairer les enjeux révélés par l'essor des neurosciences et des neurotechnologies, ce numéro des *Annales des Mines* recouvre trois approches complémentaires de ce sujet :

- une première partie se propose d'éclairer, en s'appuyant sur l'état de l'art, les relations très étroites entre l'exploration des neurosciences et l'essor de ses nouvelles applications industrielles ;
- une seconde partie dresse, par l'exemple, le panorama des applications médicales et non médicales des neurosciences et des neurotechnologies, actuelles ou telles qu'anticipées, et aide à comprendre les enjeux, voire les défis qu'elles soulèvent ;
- et une partie conclusive, qui a pour finalité de permettre au lecteur de naviguer dans la problématique de l'innovation responsable, de l'éthique et du droit à partir des espoirs soulevés, à travers l'évocation des mésusages potentiels et des limites éthiques, épistémologiques, juridiques et sociétales imposées pour une confiance informée des citoyens, des patients et des consommateurs. Pour les entreprises comme pour le secteur public, il importe en effet que les décideurs puissent orienter leurs investissements vers une offre de santé publique ou des produits commerciaux (des biens et des services) accessibles à tous, à forte utilité économique et sociale, efficaces et efficients, et qu'ils évitent tout investissement échoué, parce qu'il ne s'adapterait, en qualité comme en quantité, ni aux besoins ni aux valeurs de transparence et de délibération nécessaires à l'adoption par le plus grand nombre des offres neurotechnologiques.

(5) CHANDLER J. A. (2018), "Neurolaw and Neuroethics", *Camb Q Healthc Ethics*. 27, pp. 590-598.

(6) ADAMS A., ALBIN S., AMUNTS K., ASAKAWA T., BERNARD A., BJAALIE J. G. *et al.* (2020), "International Brain Initiative: An Innovative Framework for Coordinated Global Brain Research Efforts", *Neuron* 105, pp. 212-216.

(7) AMADIO J., BI G. Q., BOSHEARS P. F., CARTER A., DEVOR A., DOYA K. *et al.* (2018), "Neuroethics Questions to Guide Ethical Research in the International Brain Initiatives", *Neuron* 100, pp. 19-36.

(8) ROMMELFANGER K. S., JEONG S. J., MONTOJO C. & ZIRLINGER M. (2019), "Neuroethics: Think Global", *Neuron* 101, pp. 363-364, doi:10.1016/j.neuron.2019.01.041.

(9) GOERING S. & YUSTE R. (2016), "On the Necessity of Ethical Guidelines for Novel Neurotechnologies", *Cell*. 167, pp. 882-885, doi:10.1016/j.cell.2016.10.029.

(10) COUTELLEC L. & WEIL-DUBUC P.-L. (2019), « Des antidotes pour une éthique de l'innovation », *Soins* 64, pp. 56-59.

(11) COUTELLEC L. (2019), « Penser l'indissociabilité de l'éthique de la recherche, de l'intégrité scientifique et de la responsabilité sociale des sciences », *Revue d'anthropologie des connaissances* 13, n°2, p. 381.

(12) COULÉE F. & COUTELLEC L. (2020), Collection « Recherches en éthique appliquée », Éditions Érès, 192 pages.

Les gouvernements ont d'ores et déjà pris leurs responsabilités en adoptant une recommandation sur l'innovation responsable dans le domaine des neurotechnologies : la recommandation n°457 adoptée le 11 décembre 2019 par le Conseil des ministres des pays membres de l'OCDE.

Le comité éditorial des *Annales des Mines* a souhaité contribuer à la mise en œuvre de cette recommandation en dédiant ce numéro de *Réalités industrielles* aux neurotechnologies industrielles et à l'innovation responsable, un numéro spécial appelé à être diffusé gratuitement sous sa forme numérique et accessible au plus grand nombre ([www.annales.org](http://www.annales.org)).