

**Présentation devant l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et
Technologiques (O.P.E.C.S.T.) de la note scientifique
« Les neurotechnologies : défis scientifiques et éthiques »
Par Patrick Hetzel, Député, Vice-Président de l'Office
Réunion du 20-1-2022, Sénat**

Nous avons conduit à l'occasion de la réalisation de cette note scientifique un travail passionnant, enrichi par de nombreuses auditions, sur un sujet d'intérêt scientifique mais aussi politique, car je dois avouer que les neurotechnologies sont pour moi une préoccupation, surtout pour l'avenir de nos sociétés.

D'abord, que sont les neurotechnologies ? Il s'agit de technologies d'exploration (i.e de mesure) ou de modulation (le plus souvent stimulation) du système nerveux, je dis système nerveux car le terme est plus large que le cerveau, principale composante du système nerveux central : certains dispositifs sont en effet connectés au système nerveux périphérique.

La note de fin numéro 3 (en P.5) présente de manière synthétique et claire le fonctionnement du système nerveux central ou névraxe ainsi que le système nerveux périphérique, je vous y renvoie donc pour ces aspects de connaissances préalables.

Les neurotechnologies connaissent un regain d'intérêt dans la période récente, notamment sous l'effet d'initiatives émanant tant des pouvoirs publics que des entreprises privées ainsi que d'améliorations induites par le numérique. Mais il faut bien avoir en tête qu'elles restent tributaires des connaissances encore incomplètes du fonctionnement du cerveau et de ses 100 milliards de neurones et, plus globalement, du fonctionnement du système nerveux.

Et il faut bien comprendre que les neurosciences, dont les progrès dépendent des neurotechnologies et qui font réciproquement avancer ces dernières, butent en effet sur la complexité du cerveau, qui demeure de loin l'organe humain le moins bien compris par la science.

Je voudrais commencer mon exposé par une présentation rapide des technologies d'exploration de l'activité cérébrale, celles qui permettent de mesurer cette activité.

Différentes techniques d'imagerie permettent cette exploration, mais l'électroencéphalographie (EEG) est la plus utilisée car non invasive et relativement peu coûteuse en comparaison des autres dispositifs. Elle mesure l'activité électrique du cerveau grâce à des électrodes placées sur le crâne. Elle sert depuis les années 1950 à diagnostiquer et suivre de très nombreuses pathologies.

L'électrocorticogramme (ECoG) et l'EEG intracrânienne ou stéréotaxique (SEEG) sont des variantes plus performantes mais invasives (avec intervention chirurgicale) de l'EEG. La magnétoencéphalographie (MEG) non invasive quant à elle mesure les champs magnétiques produits par l'activité électrique.

L'ensemble de ces techniques, qui reposent sur l'activité électrique, donnent des résultats moins précis que d'autres méthodes basées sur l'activité métabolique, comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui permet de voir les variations hémodynamiques (changements locaux de flux sanguins) et d'oxygénation du sang liés à l'activité neuronale. De même, la tomographie par émission de positons (PET) et la scintigraphie ou tomographie par émission monophotonique (SPECT ou TEMP) permettent d'étudier le métabolisme des cellules, mais à travers la concentration de la radioactivité et la cinétique tissulaire des radiotraceurs.

Je vous renvoie en P.1 & 2 de la note pour plus de détails.

Après les technologies d'exploration, largement utilisées à des fins thérapeutiques voyons les technologies de modulation, utilisées encore plus exclusivement pour des soins médicaux.

La neuromodulation ou neurostimulation consiste à intervenir sur les circuits neuronaux à l'aide de courant électrique, de lumière, d'ultrasons ou de champs magnétiques. Les méthodes non-invasives, comme la stimulation transcrânienne, magnétique (TMS) ou électrique (tDCS), ont des effets qui restent débattus : elles varient selon la fréquence du courant et la polarité et sont moins précises que la stimulation invasive implantée car le courant administré ou induit l'est de manière peu ciblée.

À l'inverse, la stimulation cérébrale profonde ou Deep Brain Stimulation (DBS) offre des résultats incontestables dans le cas de certaines pathologies, surtout la maladie de Parkinson (cf. l'encadré P.2 et la note de fin avec une image d'illustration en P.6). Elle consiste à implanter dans le cerveau avec une précision millimétrique deux électrodes au niveau des noyaux sous-thalamiques reliées à deux piles électriques implantées au niveau sous-claviculaire ou abdominal qui vont délivrer un courant continu. La corrosion et la formation de tissus autour des électrodes réduisent peu à peu le signal dans le temps.

Je précise que les techniques d'imagerie vues au tout début de mon exposé peuvent s'insérer dans des boucles de rétroaction ou rétrocontrôle entre le système nerveux et des ordinateurs (on parle de *neurofeedback*), permettant d'utiliser les informations relatives à une fonction pour contrôler et modifier cette fonction, le plus souvent grâce à l'EEG.

Proches mais souvent distinguées du *neurofeedback*, les interfaces cerveau-machine (ICM ou BCI selon l'acronyme anglais de *Brain-Computer Interfaces*), ont enrichi le champ des neurotechnologies, avec l'exemple spectaculaire des neuroprothèses. Parmi les ICM, on distingue des dispositifs unidirectionnels ou bidirectionnels, invasifs ou non invasifs.

En dépit d'un bilan clinique nuancé, des résultats probants sont apparus pour les ICM, en termes de communication (déplacement de curseur, clavier virtuel, jeux vidéos...), d'applications militaires, ou, surtout, de compensations du handicap.

Ces applications militaires concernent les exosquelettes et les prothèses, mais aussi l'analyse de l'activité cérébrale - pour déclencher une arme plus rapidement ou contrôler la vigilance des soldats par exemple.

Pour compenser certains handicaps sensoriels ou moteurs, les neurotechnologies offrent des solutions de récupération. Des neuroprothèses sensorielles qui se composent de capteurs d'informations et d'un processeur pour les transformer en stimuli électriques, transmettent ainsi des informations sensorielles au cerveau par des électrodes lorsque l'organe ou la chaîne de transmission normale est défaillant. Lorsque le nerf optique est intact mais que les cellules photoréceptrices ont dégénéré (cas des rétinopathies pigmentaires et des dégénérescences maculaires liées à l'âge notamment), des rétines artificielles peuvent restaurer une vision de base, par l'implantation d'une puce sur la rétine, qui crée des courants électriques pour stimuler les cellules menant au nerf optique. En cas de surdité avec un nerf auditif intact, un implant cochléaire peut en seconde intention redonner l'audition grâce à un microphone qui capte les sons et les convertit en signaux électriques, appliqués à différents endroits de la structure hélicoïdale de l'oreille interne pour stimuler le nerf auditif, comme le montre le schéma en P.7 de la note.

Plusieurs technologies permettent aussi de compenser un handicap moteur, mais elles restent à ce stade réservées aux laboratoires (sauf pour la rééducation post-AVC). Causées par une blessure à la moelle épinière qui empêche les signaux nerveux de circuler entre le cerveau et le reste du corps situé sous la blessure, la paraplégie et la tétraplégie pourront être surmontées en redonnant au patient le contrôle de ses membres grâce à un contrôleur.

La stimulation électrique consiste en l'application sur les muscles ou sur les nerfs contrôlant les muscles de stimuli électriques, pour assister ou remplacer les contractions volontaires. Cependant, l'opération d'implantation est très longue, les actions sont lentes, les muscles fatiguent vite et le patient a besoin de l'aide d'une personne ou d'un déambulateur. Les neuroprothèses motrices lisent les informations motrices volontaires dans le cerveau, les interprètent, et transmettent à un exosquelette ou à un membre (artificiel ou non) les actions mécaniques à effectuer. Enfin, les neuroprothèses bidirectionnelles se composent d'une prothèse motrice, de capteurs et de propriocepteurs, ces derniers permettant un retour vers le cerveau ou vers le contrôleur de l'action effectuée par la prothèse, afin de pouvoir adapter la commande du mouvement, retrouver le sens du toucher et ressentir des signaux proches de la douleur.

On le voit, les neurotechnologies sont de plus en plus utilisées pour soigner ou réparer les handicaps. L'intérêt grandissant du secteur privé, en particulier pour les interfaces cerveau-machine, pose la question de leurs applications non médicales. De plus en plus d'entreprises investissent le champ des neurotechnologies, faisant le pari de l'hybridation du cerveau avec l'intelligence artificielle (IA), sujet abordé dans le rapport de nos collègues C.de Ganay et D.Gillot en 2017. En fait, les entreprises se positionnent surtout aujourd'hui par rapport aux usages du *neurofeedback* et des ICM (interfaces cerveau-machine) avec des investissements massifs dans la recherche, en vue d'applications souvent non médicales en dépit d'un cadre juridique restrictif. Il s'agit par exemple de commercialiser des produits grand public à l'efficacité souvent incertaine, en matière de contrôle d'interfaces numériques par la pensée (jeux vidéo...), d'aide à la concentration, à la relaxation, au sommeil et plus généralement au bien-être, voire d'amélioration des performances cognitives et sportives.

Il peut aussi s'agir de détecter la perte d'attention en voiture, en classe ou au travail. En Chine, selon plusieurs experts auditionnés, des expériences seraient menées pour surveiller les ondes cérébrales des élèves et des ouvriers grâce à des ICM, de manière à lutter contre les états émotionnels défavorables à la concentration.

Alors pour aller vers une conclusion, quels sont les défis pour la recherche aujourd'hui ? J'en donne le détail en P.3 de la note, en gros ce domaine profite de grands projets de recherche publics ou privés et progresse sans cesse, les efforts se concentrant notamment autour de l'extension de l'application des neurotechnologies déjà connues à d'autres pathologies et de l'augmentation de leur précision. Cette précision accrue est en cours en matière d'exploration cérébrale, mais aussi de stimulation cérébrale, j'en fournis les principales voies d'amélioration. Il faut bien avoir conscience des limites des neurotechnologies : leur efficacité inégale, leurs effets secondaires, l'implantation d'électrodes dans le cerveau pouvant causer des infections, des hémorragies ou des dysfonctionnements cérébraux. Les stimulations peuvent provoquer des crises d'épilepsie, modifier les capacités de plasticité du cerveau, interférer avec les pensées, les émotions, voire le libre arbitre du patient. Tout cela pose donc d'importants enjeux éthiques. C'est pourquoi j'ai mis l'accent sur les développements les plus récents en la matière en P.4 de la note.

Il existe un risque de dérives potentielles dans l'utilisation des neurotechnologies. Des appareils à bas coûts destinés aux particuliers se diffusent et peuvent être de mauvaise qualité, inefficaces, ou même dangereux. De manière plus générale, les neurotechnologies soulèvent des questions éthiques quant à l'intégrité du corps humain et aux droits des patients à leurs données. Ces dernières doivent être protégées car elles pourraient être utilisées dans un but discriminatoire ou malveillant.

Une mobilisation internationale s'est mise en place récemment pour répondre aux défis éthiques de ces technologies, la Convention d'Oviedo de 1997 sur les droits de l'Homme et la biomédecine étant insuffisante – bien que premier instrument juridique international contraignant en ce qui concerne la protection des droits contre toute application abusive des progrès biologiques et médicaux. L'OCDE a, en décembre 2019, formulé neuf principes en vue d'encadrer l'innovation en neurotechnologies dans une recommandation qui se déclinera sur un plan national. Le gouvernement travaille ainsi à l'adoption d'une charte pour un développement responsable et éthique des neurotechnologies en France.

Certaines initiatives vont plus loin que les droits habituels des patients (dont la dignité, l'intégrité du corps humain, le principe du consentement éclairé, le droit à l'information), la protection des données personnelles, la fiabilité, sûreté et sécurité des dispositifs, ou la prévention des usages abusifs voire malveillants : elles portent sur la protection de la personnalité et le respect du libre arbitre. Ainsi du rapport pour 2022 du Comité international de bioéthique (CIB) de l'UNESCO, appelant à créer un nouvel ensemble de droits, appelés neurodroits, tels que l'intimité mentale ou le libre arbitre, allant plus loin que la protection traditionnelle des droits de l'homme. Ainsi du Chili qui a adopté en octobre 2021 une loi protégeant les droits du cerveau des citoyens, qui vise le respect des neurodroits, comprenant les droits à l'identité personnelle, au libre arbitre et à l'intimité mentale.

Voici pour conclure les propositions que je souhaite que nous défendions pour l'Office : il nous faut renforcer la coordination de la recherche française en neurosciences et en neurotechnologies, trop morcelée entre petites équipes peu financées, tout le monde nous l'a dit. Cette recommandation peut avoir l'air générale mais nous avons en fait une vision assez claire de sa traduction pratique.

Il convient de favoriser le développement de l'écosystème de la recherche par la mise en place d'un consortium (du type de *Braingate* aux États-Unis), voire d'un réseau national de recherche en neurotechnologies fédérant les acteurs : instituts de recherche, hôpitaux, recherche militaire et industries - les transports et de l'automobile peuvent notamment être évoquées, car elles développent d'ores et déjà des solutions de neurotechnologies pour leurs futurs produits. Il s'agit d'un point d'autant plus important que la France dispose d'atouts et se trouve souvent à la pointe de la recherche mondiale en matière de neurotechnologies, en particulier pour la recherche clinique (avec la stimulation cérébrale profonde, les implants cochléaires, les rétines artificielles, les neuroprothèses, l'optogénétique...).

Autre proposition très concrète : en partenariat avec l'Institut du Cerveau et l'Institut de la Vision, un pôle d'excellence en neurotechnologies pourrait émerger à Paris-Saclay, déjà au meilleur niveau en neurosciences (avec NeuroSpin, NeuroPSI...) et regroupant d'excellentes écoles d'ingénieurs.

S'agissant spécifiquement de l'éthique des neurotechnologies, il faut :

- 1-poursuivre le travail de transposition au niveau national de la recommandation de l'OCDE ;
- 2-définir un cadre législatif protecteur, proche de celui adopté au Chili, en mettant l'accent sur la sécurité des dispositifs, le respect du droit à l'intégrité de son corps et du droit à la vie privée, la protection des données personnelles, y compris les données issues de l'enregistrement de l'activité cérébrale et en écartant la notion trop floue de libre arbitre ;
- 3- veiller à ce que le cadre défini ne conduise pas à décourager la recherche et à réduire notre compétitivité.

Même si le projet transhumaniste relève encore largement de la science-fiction à ce stade, une certaine vigilance doit rester de mise face à la tentation de l'homme augmenté : les neurotechnologies doivent, d'abord et avant tout, servir à guérir et à réparer. Je vous remercie !