



Source : INRIA

Résumé

- Technologies d'exploration ou de modulation du système nerveux, 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.
- En matière de recherche, pour laquelle la France est bien placée et ne doit pas décrocher, le secteur a encore de nombreux défis à relever, le plus souvent en relation avec l'amélioration de la précision des dispositifs utilisés, ces progrès étant eux-mêmes liés aux avancées dans la connaissance du cerveau.
- Les enjeux éthiques sont croissants et plaident pour une régulation de ces technologies comme en témoignent de nombreuses initiatives au niveau international. À long terme, la vigilance doit être de mise face au projet transhumaniste d'homme augmenté : les neurotechnologies doivent, d'abord et avant tout, servir à guérir et à réparer.

Patrick Hetzel, Député, Vice-Président

■ Des technologies liées aux neurosciences

Outils de mesure ou de modulation du système nerveux et notamment de l'activité cérébrale, 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⁽¹⁾ ainsi que d'améliorations induites par le numérique, au travers d'interfaces de plus en plus performantes. Héritières de méthodes controversées⁽²⁾, voire abandonnées dans le cas de la lobotomie, **ces techniques 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 central et périphérique⁽³⁾. 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.

■ Les technologies d'exploration de l'activité cérébrale

Différentes techniques d'imagerie permettent cette exploration. L'**électroencéphalographie** (EEG) est non invasive et relativement peu coûteuse en comparaison des autres dispositifs et se trouve donc très utilisée. 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 (malgré une

résolution spatiale de plus d'un cm²). Elle permet aussi d'étudier le sommeil et, le cas échéant, ses troubles. L'électrocorticographie (ECoG) et l'EEG intracrânienne ou stéréotaxique (SEEG) sont des variantes plus performantes mais invasives (avec intervention chirurgicale) de l'EEG. La **magnétoencéphalographie** (MEG) mesure les faibles champs magnétiques produits par l'activité électrique d'un groupe de neurones (résolution de 2 à 3 mm²), avec une utilisation large au niveau clinique, par exemple afin de localiser des foyers épileptiques avant opération. Les EEG et les MEG permettent d'enregistrer le **potentiel évoqué** (PE), qui mesure la modification du potentiel électrique des neurones après une stimulation sensorielle et permet de renseigner sur l'état de fonctionnement de la voie stimulée (nerfs auditifs, optiques, ou moteurs par exemple).

L'ensemble de ces techniques, qui reposent sur l'activité électrique, donnent des résultats le plus souvent moins précis que d'autres méthodes basées sur l'activité métabolique : l'**imagerie par résonance magnétique fonctionnelle** (IRMf) permet ainsi de voir les variations hémodynamiques (changements locaux de flux sanguins) et d'oxygénation du sang liés à l'activité neuronale. Sa résolution spatiale peut descendre jusqu'à 500 μm² en moyenne mais sa résolution temporelle est limitée. De même, la **tomographie par émission de positons** (PET) et la **scintigraphie ou tomographie par émission monophotonique** (SPECT ou TEMP) détectent par une caméra, respectivement, les

positons ou les rayons gammas émis par un traceur radiomarqué dont on connaît le comportement et les propriétés biologiques, afin de suivre la concentration de la radioactivité et la cinétique tissulaire du radiotracer, pour étudier le métabolisme des cellules. En outre, d'autres techniques peuvent être mentionnées comme l'**imagerie ultrasonore transcrânienne** (qui pourra faciliter le diagnostic et le suivi des AVC) ou la **spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle** (SPIRf qui mesure l'oxygénation du cerveau afin d'en déduire son activité).

■ Soigner par les neurotechnologies

Les neurotechnologies sont largement utilisées à **des fins thérapeutiques**, souvent en association avec les techniques d'imagerie vues plus haut (surtout EEG, MEG et IRMf). Dans le cas de la **neuromodulation** ou neurostimulation, il s'agit d'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), dont l'effet varie selon la fréquence du courant et la polarité (inhibiteur du côté de la cathode, excitant du côté de l'anode), sont moins précises que la stimulation invasive implantée car le courant administré ou induit l'est de manière peu ciblée. Bien que faisant l'objet de recherches médicales pour traiter la dépression, la douleur, la schizophrénie ou des maladies neurologiques, leur effet reste débattu. À l'inverse, la **stimulation cérébrale profonde** ou *Deep Brain Stimulation* (DBS) offre des résultats incontestables dans le cas de certaines pathologies⁽⁴⁾.

La stimulation cérébrale profonde

La DBS est aujourd'hui utilisée empiriquement avec succès dans le traitement en seconde intention de la maladie de Parkinson, à la suite des travaux du professeur Alim-Louis Benabid (diminution des tremblements de 80 % en dépit d'effets indésirables sur une minorité de patients comme l'apathie, des troubles de l'élocution ou une prise de poids). 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 (2 à 3 volts et 130 impulsions par seconde, soit 100 à 200 Hz de fréquence). La corrosion et la formation de tissus autour des électrodes réduisent peu à peu le signal dans le temps. Les piles ont une durée de vie de l'ordre de cinq ans, en fonction de l'intensité de la stimulation. Une intervention chirurgicale est nécessaire à chaque changement de matériel et des piles d'une durée de vie de 25 ans sont actuellement développées. D'autres applications pourraient concerner la maladie d'Alzheimer et des troubles psychiques résistants aux autres traitements, tels que des formes sévères de dépression ou des troubles obsessionnels compulsifs.

Des **neuromodulations invasives mais moins profondes** montrent aussi des effets sur les patients traités, qu'il s'agisse de réduire une douleur chronique, de faire disparaître la

sensation de faim chez les personnes obèses ou de prévenir les crises d'épilepsie (une électrode hélicoïdale implantée autour du nerf vague le stimule à intervalles réguliers). Utilisée dans un cadre médical, la **réalité virtuelle** donne également des résultats intéressants sur les troubles mentaux, surtout en complément d'autres thérapies⁽⁵⁾.

■ Neurofeedback et interfaces cerveau-machine (ICM)

Les techniques d'imagerie vues précédemment peuvent s'insérer dans un *neurofeedback*, i.e. des boucles de **rétroaction** (ou rétrocontrôle) entre le système nerveux et des ordinateurs 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**⁽⁶⁾ (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. Après des recherches pionnières sur les singes puis les hommes, dans les années 1970 et 1980, et en dépit d'un bilan clinique nuancé⁽⁷⁾, des résultats probants sont apparus plus récemment, en termes de **communication** (déplacement de curseur, clavier virtuel, jeux vidéos...), d'applications **militaires**⁽⁸⁾, ou, surtout, de compensations du handicap.

■ Compenser certains handicaps

Face aux **handicaps sensoriels** (auditif, visuel..) ou **moteurs** (paralysies, perte d'un membre...), les neurotechnologies apportent 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 lorsque la puce est exposée à de la lumière ou lorsqu'une caméra externe lui envoie des informations visuelles⁽⁹⁾. 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⁽¹⁰⁾.

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** sont des

paralysies qu'il est possible de surmonter en redonnant au patient le contrôle de ses membres grâce à un contrôleur : la stimulation électrique fonctionnelle consiste en l'application sur les nerfs contrôlant les muscles, ou directement sur les muscles, de stimuli électriques de faible intensité, pour assister ou remplacer les contractions volontaires. Des signaux électriques très complexes sont envoyés aux muscles grâce à des électrodes placées sur chacun d'eux. 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. Des ICM sont aussi utilisées dans le cas de patients atteints de sclérose latérale amyotrophique, à un stade avancé. Les **neuroprothèses motrices** lisent les informations motrices volontaires dans le cerveau, les interprètent, et transmettent à un **exosquelette**⁽¹¹⁾ ou à un membre (artificiel ou non) les actions mécaniques à effectuer⁽¹²⁾. 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⁽¹³⁾.

■ L'intérêt grandissant du secteur privé et la question des 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)⁽¹⁴⁾, à l'instar de **Neuralink**, fondée par Elon Musk en 2017, qui s'est fixée pour objectif de faire marcher des personnes paralysées, de traiter les maladies neurologiques mais aussi d'améliorer les capacités cognitives naturelles. La dernière version de son implant de 23 mm de diamètre, 8 mm d'épaisseur, rechargé quotidiennement par induction et composé de 1 024 électrodes (des fils extrêmement fins proches de la taille d'un neurone) a été testée en 2020 sur des cochons (après des rats et un singe) et attend une autorisation pour débiter des essais cliniques sur l'homme⁽¹⁵⁾.

L'intérêt croissant des entreprises pour le *neurofeedback* et les ICM s'accompagne d'**investissements massifs dans la recherche**, en vue d'applications surtout non médicales en dépit d'un **cadre juridique restrictif**⁽¹⁶⁾. 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 (transmission et réception d'informations vers et depuis un ordinateur, divertissement et jeux vidéo...), d'aide à la concentration, à la relaxation, au sommeil et plus généralement au bien-être, ou d'amélioration des performances cognitives et sportives. Le potentiel de développement du *neurofeedback* par EEG en tant que dispositif « individuel » est grand, même si les résultats sont très variables et ont tendance à être **surestimés**, pas seulement en raison d'effets d'annonces⁽¹⁷⁾.

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.

■ Relever les défis de la recherche

Le 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 (comme l'utilisation de la stimulation cérébrale profonde pour soigner TOC, syndromes Gilles de la Tourette, dépression etc.) et de l'augmentation de leur **précision**.

En matière d'**exploration cérébrale**, les progrès à venir passeront par la standardisation des mesures (chaque fabricant a ses propres références) ; le recours simultané à l'IRMf et à l'EEG ou MEG ; pour les IRMf le déploiement de l'imagerie à résolution élevée et sans latence, dite à haut-champ⁽¹⁸⁾ ainsi que de dispositifs à champ faible de petite dimension pour faciliter la diffusion de la technologie ; pour les EEG l'**augmentation de la résolution** (moins d'un cm²), la simplification de la pose des capteurs (souvent longue et inconfortable) et la possibilité d'utiliser des électrodes sèches ; pour les MEG un fonctionnement à température ambiante⁽¹⁹⁾ (contre proche du zéro absolu actuellement).

Pour ce qui concerne la **stimulation cérébrale**, les électrodes, dont le diamètre est aujourd'hui de 5 microns au mieux, seront de plus en plus fines pour se rapprocher d'une mesure au neurone près. De plus, les matériaux utilisés seront **plus souples et biocompatibles**⁽²⁰⁾, pour éviter d'être reconnus comme corps étranger et limiter la perte de signal. Enfin, les électrodes circconférentielles qui mesurent le potentiel dans tout leur voisinage seront remplacées par des électrodes **directionnelles**, pour limiter les signaux parasites. Cette précision accrue permettra de réaliser un **maillage plus fin** et d'utiliser un plus grand nombre d'électrodes, afin de restituer les variations locales et globales d'influx nerveux. La *Brain Initiative* américaine développe des électrodes mixtes et modulables permettant d'enregistrer et de stimuler à différentes échelles l'activité des neurones, électriquement, magnétiquement et optiquement, ces **électrodes mixtes** étant une perspective riche de promesses. Une piste enthousiasmante mais incertaine concerne l'**optogénétique**⁽²¹⁾. Enfin, l'utilisation de meilleurs radiotraceurs permettra des **thérapies plus ciblées**⁽²²⁾.

Il faut avoir, par ailleurs, conscience des **limites** des neurotechnologies (efficacité inégale, effets secondaires, l'implantation d'électrodes dans le cerveau pouvant causer des infections, des hémorragies ou des dysfonctionnements cérébraux). Les stimulations électriques ou magnétiques 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.

■ Les enjeux éthiques

L'utilisation des neurotechnologies a un **impact sur le cerveau**, soit comme but recherché, soit en tant qu'effet secondaire, et la personnalité du patient ou de l'utilisateur peut être altérée, faisant par exemple survenir dépression ou euphorie. Le recul n'est pas suffisant pour évaluer si les bénéfices de certaines neurotechnologies sont bien supérieurs aux effets secondaires. Au-delà de ces risques intrinsèques, il existe des **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 (cas de dégâts cognitifs ou de brûlures du cuir chevelu).

De manière plus générale, les neurotechnologies soulèvent des **questions éthiques** quant 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 donc 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 – premier instrument juridique international contraignant en ce qui concerne la protection des droits contre toute application abusive des progrès biologiques et médicaux – étant insuffisante. L'**OCDE** a, en décembre 2019⁽²³⁾, formulé neuf principes en vue d'encadrer l'innovation en neurotechnologies. Cette recommandation, première norme internationale dans le domaine, se déclinera sur un plan national. Le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) travaille ainsi avec d'autres acteurs à l'adoption d'une **charte pour un développement responsable et éthique des neurotechnologies en France**⁽²⁴⁾.

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.

Le rapport pour 2022 du Comité international de bioéthique (CIB) de l'**UNESCO** sur les « enjeux éthiques des neurotechnologies »⁽²⁵⁾, appelle ainsi à créer un nouvel ensemble de droits de l'homme, appelés **neurodroits**, tels que l'intimité mentale ou le libre arbitre, allant plus loin que la protection traditionnelle des droits de l'homme⁽²⁶⁾. Ce rapport invite chaque État à garantir les droits neurologiques de ses citoyens en adoptant des lois protectrices du droit à la vie privée, à la protection de l'activité cérébrale et à la liberté de pensée à l'égard des neurotechnologies, en insistant sur la nécessité d'accorder une attention particulière aux enfants et adolescents, en raison de la plasticité de leur cerveau en

développement⁽²⁷⁾. L'UNESCO a également annoncé conduire des discussions pour développer une feuille de route qui servira de base à un cadre mondial pour la gouvernance des neurotechnologies.

Le **Chili** a anticipé ces évolutions en adoptant en octobre 2021 une loi protégeant les droits du cerveau des citoyens, qui vise le respect des neurodroits⁽²⁸⁾, comprenant les droits à l'identité personnelle, au libre arbitre et à l'intimité mentale.

■ Les recommandations de l'Office

Dans la continuité de ses travaux⁽²⁹⁾, l'Office propose de **renforcer la coordination et le regroupement de la recherche française** en neurosciences et en neurotechnologies, trop morcelée entre petites équipes peu financées (le nombre de chercheurs permanents en neurosciences au CNRS a baissé de 20 % en dix ans).

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⁽³⁰⁾.

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...).

En partenariat avec l'Institut du Cerveau et l'Institut de la Vision, basés à Paris, 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 est préconisé de :

- poursuivre le travail de transposition au niveau national de la recommandation de l'OCDE sur l'encadrement de l'innovation en neurotechnologies ;
- 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 ;
- et 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**.

Sites Internet de l'Office :

<http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opepst-index.asp>

<http://www.senat.fr/opepst>

Références

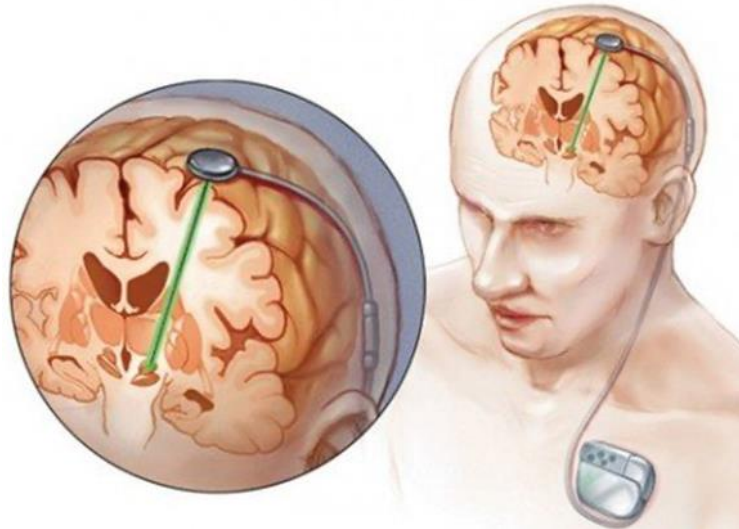
¹ Du côté des pouvoirs publics, ces initiatives sont, par exemple, des grands projets de recherche sur le fonctionnement du cerveau en lien avec le secteur privé (les États-Unis ont lancé en 2013 le Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies ou Brain initiative doté de 4,5 milliards de dollars sur douze ans, l'Union européenne a mis en place la même année le Human Brain Project avec un milliard d'euros sur dix ans, la Chine avec son China Brain Project se situe dans le même ordre de grandeur et de nombreux autres États ont initié des grandes initiatives nationales comme au Japon, en Israël, en Australie etc.). Pour leur part, les entreprises privées, surtout américaines, investissent de façon inédite dans la recherche en neurotechnologies, particulièrement dans les interfaces cerveau-machine (ICM). L'entreprise Neuralink, fondée par Elon Musk et dans laquelle plusieurs centaines de millions de dollars ont été investis, est la plus emblématique mais d'autres cas peuvent être cités : Meta/Facebook (rachat de CTRL-labs en 2019 pour un milliard de dollars et d'Oculus en 2014 pour deux milliards de dollars), Kernel, Synchron, Allen Institute, le consortium Braingate avec Cyberkinetics, Blackrock Neurotech, le Wyss Center et General Motors, ou des plus petits comme Muse, Halo, Emotiv... En France, on peut relever les entreprises BrainTech, NextMind, Clarity ou, encore, Dreem.

² Parmi ces méthodes, l'électroconvulsivothérapie (ECT), connue sous le nom de thérapie par électrochocs, est sans doute la plus célèbre. Ses résultats en psychiatrie pour traiter des dépressions, des états maniaques, paranoïaques, catatoniques ou psychotiques (notamment la schizophrénie) sont avérés, en dépit de son côté parfois traumatisant voire déshumanisant. Ses mécanismes d'action restent encore mal connus mais sont probablement liés à la réduction des connexions cérébrales dans le cortex préfrontal dorsolatéral. Quant à la lobotomie, qui a décliné depuis les années 1960 jusqu'à être abandonnée dans les années 1980, elle consistait le plus souvent en une résection par voie trans-orbitaire de la substance blanche du lobe frontal (méthode dite du pic à glace, qui a succédé à des pratiques de leucotomies encore plus invasives ou plus grossières). La psychiatrie a eu recours à cette neurochirurgie avant les neuroleptiques pour traiter des états psychotiques tels que la schizophrénie ou des dépressions sévères. L'immense majorité des patients étaient des femmes, ce qui dénote un lien entre les pratiques médicales et les rapports de domination dans la société, en particulier les préjugés liés au genre. Globalement, les mécanismes d'action de la lobotomie mais aussi des électrochocs restent encore très incertains d'un point de vue scientifique. Cf. l'histoire de la lobotomie par Louis-Marie Terrier, Marc Levêque et Aymeric Amelot, parue dans la Lettre des Neurosciences, n° 55, 2018 et des mêmes auteurs « Most lobotomies were done on women », *Nature*, volume 548, n° 523, 2017 <https://www.nature.com/articles/548523e>

³ Le système nerveux central ou névraxe comporte deux organes principaux : le cerveau, d'une part, qui assure les fonctions cognitives et exerce l'intégration des informations (sensorielles par exemple), de commande et de contrôle de la motricité, et la moelle épinière, d'autre part, qui transmet les influx nerveux en provenance et à destination du cerveau (logique bidirectionnelle) et qui coordonne les actions motrices, notamment les réflexes. Les nerfs sont chargés de transmettre les influx nerveux entre la moelle épinière et les organes. Le cerveau se compose de deux hémisphères (droit et gauche) et du cervelet qui gère l'équilibre du corps. Les hémisphères peuvent être divisés en lobes : le lobe frontal (raisonnement, langage, coordination motrice volontaire), le lobe pariétal (conscience du corps et de l'espace environnant), le lobe occipital (intégration des messages), et le lobe temporal (audition, mémoire et émotions). Les principaux circuits d'information sont la boucle entre thalamus et cortex sensoriels, pour le traitement des informations sensorielles entrantes, la boucle impliquant striatum, cortex moteur, cervelet et thalamus qui génère les commandes motrices complexes, ou, encore, le circuit de la mémoire avec l'hypocampe ainsi que les cortex cyngulaires et temporaux. Le cerveau contient un réseau de cellules nerveuses appelées neurones, dans lequel l'information circule à grande vitesse sous forme d'impulsions électriques. Chaque neurone se compose d'un corps abritant le noyau, de dendrites qui collectent les signaux envoyés par d'autres neurones et, enfin, d'un axone qui leur envoie des signaux. L'axone est protégé par une gaine de myéline, qui permet également une meilleure diffusion des signaux. Ces signaux neuronaux sont des courants électriques nommés influx nerveux ou potentiels d'action. L'axone d'un neurone se connecte aux dendrites d'autres neurones par l'intermédiaire de synapses (jusqu'à 100 000 par neurone, avec une moyenne de 10 000). Lorsqu'un influx nerveux arrive dans la terminaison synaptique, des neurotransmetteurs chimiques sont sécrétés dans le milieu extracellulaire pour inhiber ou exciter les neurones connectés en se fixant sur leurs récepteurs transmembranaires. Le cerveau contient également des cellules gliales (astrocytes et oligodendrocytes au moins aussi nombreuses que les neurones, eux-mêmes déjà au nombre de 100 milliards), essentielles et responsables de l'homéostasie (le maintien des conditions de fonctionnement), de la production de myéline (gaine isolante des neurones), du soutien des tissus cérébraux, de l'apport en nutriment et en oxygène des neurones, et, dans le cas particulier des cellules microgliales, de l'élimination des cellules mortes et des pathogènes. Ces cellules sont donc chargées de détruire les corps étrangers ou de les recouvrir de tissus rigides. La moelle épinière est composée des mêmes cellules et transmet les informations sensorielles, ascendantes, vers le cerveau, ainsi que les informations motrices, descendantes, vers les différentes parties du corps. Différents nerfs émergent autour de la moelle épinière. Formant le système nerveux périphérique, ils sont composés de neurones sensoriels et moteurs, qui vont innover tous les organes (peau, muscles, viscères etc.) et les connecter au système nerveux central.

⁴. Le coût de chaque dispositif est de l'ordre de 30 000 euros et se présente conformément au schéma suivant :

Dispositif de stimulation cérébrale profonde (DBS)



Source : Mayo Clinic

⁵ De nouvelles thérapies associent en effet la réalité virtuelle avec la neuro-imagerie et/ou des ICM dans le but de stimuler certaines zones cérébrales et de traiter des troubles psychiatriques ou même des déficiences motrices, par exemple après AVC, dans le but de redonner de la plasticité au cerveau (exemple du projet Hemisfer conduit par l'Inria et le CHU de Rennes).

⁶ On rencontre le terme d'interfaces cerveau-machine (ICM) mais aussi celui d'interfaces cerveau-ordinateur (ICO) ou d'interfaces neuronales directes (IND). La notion d'ICM est la plus générale : les IND et les ICO relient le plus souvent le système nerveux à un ordinateur alors que les neuroprothèses relient plus directement le système nerveux à une prothèse. Cf. l'un des premiers ouvrages en français sur le sujet, Maureen Clerc, Laurent Bougrain et Fabien Lotte (dir.), Les interfaces cerveau-ordinateur, éditions ISTE, 2018, ainsi que le rapport de Bernard Bioulac, André-Raymond Ardaillou et Bruno Jarry Interfaces cerveau-machine : essais d'applications médicales, technologie et questions éthiques, publié en décembre 2020 par l'Académie de médecine et l'Académie des technologies : <https://www.academie-medecine.fr/rapport-20-06-interfaces-cerveau-machine-essais-dapplications-medicales-technologie-et-questions-ethiques/>

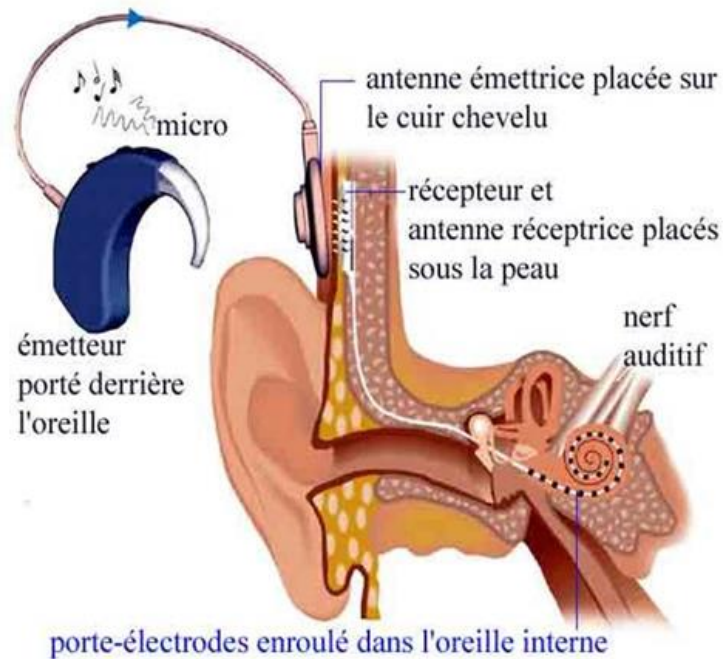
⁷ Les études disponibles montrent une efficacité limitée des ICM avec neurofeedback sur les problèmes de santé, sauf dans le cas de la rééducation post-AVC (accident vasculaire cérébral) qui semble efficace. Cf. la seule méta-analyse disponible, qui porte sur la douleur chronique : Kajal Patel et al. « Effects of neurofeedback in the management of chronic pain: A systematic review and meta-analysis of clinical trials », European Journal of Pain, volume 24, n 8, 2020 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ejp.1612>

⁸ Les applications militaires concernent les exosquelettes et les prothèses, l'analyse de l'activité cérébrale (pour déclencher une arme plus rapidement ou contrôler la vigilance des soldats par exemple), l'entraînement cérébral... Dans son avis du 18 septembre 2020 sur le soldat augmenté, le Comité d'éthique de la défense se prononce favorablement à ces technologies d'augmentation mais demande à ce qu'elles soient évaluées par rapport à leur impact sur la santé physique et mentale du militaire, avec une analyse bénéfice/risque. Il recommande également de fixer comme principe le consentement du militaire, avec une information préalable sur les risques induits. Il souligne aussi la nécessité de l'accompagnement du service de santé des Armées durant tout le cycle de vie d'une augmentation et la recherche d'une réversibilité. Enfin, avec le souci d'éviter d'inhiber la recherche sur le soldat augmenté et tout risque de décrochage capacitair de nos armées, l'avis recommande de s'interdire toute augmentation qui serait de nature à diminuer la maîtrise de l'emploi de la force, porterait atteinte au libre arbitre, ou serait contraire au respect du principe de la dignité de la personne humaine. Cf. <https://www.defense.gouv.fr/salle-de-presse/communiqués/communiqué-le-comité-d-ethique-de-la-defense-publie-son-avis-sur-le-soldat-augmente>

⁹ L'objectif est de pouvoir reconnaître des visages, de lire ou encore de se déplacer en autonomie, et pour cela, une résolution de 600 à 1 000 pixels est suffisante mais les performances du meilleur implant actuel avec 1 500 électrodes peinent à les atteindre : multiplier les électrodes n'augmente pas forcément la résolution car cette dernière est détériorée par les réactions inflammatoires des tissus autour de l'implant, qui compliquent le ciblage des courants électriques. Le coût de chaque dispositif est d'environ 90 000 euros.

¹⁰ La durée de vie de l'implant cochléaire est d'environ 20 ans. Il faut remarquer que les sons perçus, traités et transmis sous une forme numérique, sont très différents de ceux obtenus naturellement par une oreille normale et nécessitent un temps d'adaptation et une rééducation d'un an avec un orthophoniste. Si le nerf auditif est touché, un implant auditif peut être relié au noyau cochléaire, mais la qualité du son ne permet plus de comprendre un discours, et aide uniquement à la lecture labiale. Le coût de chaque dispositif est d'environ 23 000 euros.

L'implant cochléaire



Source : Isabelle Mosnier et Yann Nguyen, APHP et Sorbonne Université

11

L'exosquelette de Clinatec



Source : Clinatec, CEA, LETI, CHU de Grenoble

¹² Les informations motrices proviennent soit de muscles toujours liés au cerveau, grâce à un électromyogramme, soit du système nerveux par le biais d'électrodes. Pour des applications complexes comme des prothèses de main ou des exosquelettes, les électrodes cérébrales internes implantées dans le cortex moteur sont préférées.

¹³ Les patients souffrant d'une hémiplégié ont souvent des problèmes lors de la marche. Ils ne peuvent pas soulever le bout de leur pied avant qu'il ne touche le sol, car cela nécessite une impulsion nerveuse qui ne peut pas être transmise. Cette impulsion peut être recrée par une électrode et son déclenchement orchestré grâce au couplage entre des capteurs et le contrôleur. Pour les patients ayant été amputés, des mécanorécepteurs intégrés dans la prothèse permettent de retrouver la sensibilité du membre, notamment pour protéger le corps du patient et la prothèse par la réaction à une douleur, ou pour mieux contrôler la prothèse en ressentant la pression appliquée sur un objet.

¹⁴ L'Office a, dès 2017, alerté sur la part prépondérante prise par la recherche privée et sur les enjeux éthiques des technologies d'intelligence artificielle dans le rapport n° 464 (2016-2017) de M. Claude de Ganay député et Mme Dominique Gillot,

sénatrice « Pour une intelligence artificielle maîtrisée, utile et démystifiée ». Cf. les liens disponibles sur le site du Sénat <http://www.senat.fr/notice-rapport/2016/r16-464-1-notice.html> ainsi que sur le site de l'Assemblée nationale https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/14/dossiers/intelligence_artificielle_maitrisee_utile

¹⁵ À terme, Neuralink souhaite produire des puces de 4 mm par 4 mm de 10 000 électrodes, avec un échange d'informations vers l'extérieur en Bluetooth pour une application sur smartphone, partant du constat que nos capacités de communication avec nos smartphones demeurent limitées. L'opération chirurgicale d'implantation des électrodes devrait être automatisée, peu invasive et sans cicatrices. Des questions se posent quant à ces projets, surtout que cette entreprise est animée par un projet transhumaniste d'amélioration des capacités cognitives naturelles qui va plus loin que la réparation ou le soin. Pour le moment, les démonstrations portent sur des techniques déjà connues des laboratoires de recherches depuis au moins 20 ans, voire 50 ans pour certaines, parfois même chez l'humain et sans toujours avoir besoin de capteurs invasifs : Cf. en 1969 le cas d'un singe contrôlant un curseur par l'activité de ses neurones, puis en 2003 un bras robotique (les eux avec une ICM invasive), et en 2007 la possibilité pour l'homme de jouer à pong avec une ICM non invasive.

¹⁶ En France par exemple, le code de la santé publique a été enrichi d'un article L. 1151-4 par la loi du 2 août 2021 relative à la bioéthique, qui permet l'interdiction par décret des « actes, procédés, techniques, méthodes et équipements ayant pour effet de modifier l'activité cérébrale et présentant un danger grave ou une suspicion de danger grave pour la santé humaine ». Le code civil dispose ainsi dans son article 16-14, révisé par la loi du 2 août 2021 relative à la bioéthique, que « les techniques d'imagerie cérébrale ne peuvent être employées qu'à des fins médicales ou de recherche scientifique ou dans le cadre d'expertises judiciaires, à l'exclusion, dans ce cadre, de l'imagerie cérébrale fonctionnelle ». Cette dernière disposition est conforme à la position de l'Office de limiter le recours à l'imagerie cérébrale en justice (il est loisible de mentionner l'existence de la thèse de doctorat de Laura Pignatel consacrée en 2019 à cette question et, plus généralement, à l'émergence d'un « neurodroit »). Cf. le rapport de l'Office n° 476 (2011-2012) de MM. Alain Claeys et Jean-Sébastien Vialatte, députés, « L'impact et les enjeux des nouvelles technologies d'exploration et de thérapie du cerveau » sur le site du Sénat <https://www.senat.fr/notice-rapport/2011/r11-476-1-notice.html> ainsi que sur le site de l'Assemblée nationale <https://www.assemblee-nationale.fr/13/rap-off/i4469.asp> et, également, la note scientifique de l'Office n° 20 « Neurosciences et responsabilité de l'enfant » par M. Michel Amiel, sénateur (novembre 2019), disponible sur le site du Sénat https://www.senat.fr/fileadmin/Fichiers/Images/opecst/quatre_pages/OPECST_2019_0090_note_neurosciences.pdf et sur le site de l'Assemblée nationale https://www2.assemblee-nationale.fr/content/download/181379/1817000/version/3/file/OPECST_2019_0090_note_neurosciences.pdf

¹⁷ Comme le montre la méta-analyse de François Gonon, Estelle Dumas-Mallet et Sébastien Ponnou sur « La couverture médiatique des observations scientifiques concernant les troubles mentaux », le choix des sujets traités par les médias accentue gravement les distorsions déjà présentes dans la littérature scientifique, à savoir les biais de publication privilégiant les observations initiales et celles qui rapportent un effet positif. Il en résulte que les médias informent rarement le public du caractère incertain des études initiales et négligent les études rapportant une absence d'effet, surtout les observations biomédicales rapportées par les médias sont souvent contredites par les recherches ultérieures sans que le public en soit informé. Cf. <https://cahiersdujournalisme.org/V2N3/CaJ-2.3-R045.html>

¹⁸ L'IRMf à haut-champ du centre Neurospin du CEA de Saclay, le plus puissant du monde avec un champ magnétique de 11,7 teslas, a livré ses premières images le 7 octobre 2021.

¹⁹ C'est l'objectif de la start-up Mag4Health lancée par des ingénieurs du CEA-Leti à la rentrée 2021. Cf. <https://www.leti-cea.fr/cea-tech/leti/Pages/actualites/News/Magnetoencephalographie--vers-la-haute-resolution-a-temperature-ambiante.aspx>

²⁰ Des composites polymère-métal-polymère et des silicones pourraient permettre d'obtenir des propriétés de biocompatibilité, de souplesse et de durabilité des électrodes malgré leur grande fragilité.

²¹ Née en 2002 de l'observation d'une protéine sensible à la lumière découverte dans une algue (la channelrhodopsine), l'optogénétique consiste à manipuler génétiquement les cellules nerveuses afin que leur activité électrique puisse être contrôlée par la lumière. Des cellules neuronales ciblées sont modifiées via des vecteurs viraux, en vue ensuite d'exciter ou d'inhiber par stimulation optique un nombre défini de neurones. Les applications cliniques sur l'homme dépendront de la quantification des effets secondaires du génie génétique et de l'implantation des dispositifs optiques amenant la lumière dans le cerveau à travers la boîte crânienne. En effet, la précision spatiale et temporelle de cette technique dépend fortement de ces dispositifs optiques d'illumination, qui sont actuellement en développement. Une perspective d'application à court terme concerne la récupération de la vision par stimulation optogénétique de la rétine : la première application clinique réussie de l'optogénétique a ainsi eu lieu à l'Institut de la vision à Paris donnant lieu à un article publié le 24 mai 2021 dans la revue *Nature*, cf. José-Alain Sahel et al., « Partial recovery of visual function in a blind patient after optogenetic therapy » <https://www.nature.com/articles/s41591-021-01351-4>

²² C'est le cas de la visualisation de la neuroinflammation chez les patients parkinsoniens avec des radiotraceurs facilitant l'évaluation de médicaments anti-inflammatoires spécifiques.

²³ Les principes de la recommandation n° 457 de son conseil des ministres sont les suivants : promouvoir une innovation responsable ; donner la priorité à l'évaluation de la sécurité ; promouvoir l'inclusivité ; encourager la collaboration scientifique ; favoriser les débats sociétaux ; développer les capacités des organismes de surveillance et des organes

consultatifs ; protéger les données cérébrales personnelles et autres informations ; promouvoir une culture de la gestion responsable et de la confiance dans les secteurs public et privé ; anticiper et surveiller les éventuels usages non intentionnels et/ou abusifs. Cf. <https://legalinstruments.oecd.org/fr/instruments/OECD-LEGAL-0457> Dès 2017, Marcello Lenca et Roberto Andorno avaient plaidé en ce sens dans leur article « Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology » cf. <https://lssjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40504-017-0050-1>

²⁴ Le ministère anime une task force nationale sur la mise en œuvre la recommandation n° 457 de l'OCDE. La charte en préparation pourrait notamment porter sur la reconnaissance des droits des patients et des utilisateurs, la protection des données cérébrales, la fiabilité, la sûreté et la sécurité des dispositifs, l'éthique et la déontologie de la communication, la prévention des usages abusifs et la dissuasion des applications malveillantes. Cette task force fait l'objet de plusieurs articles dans un numéro de la revue des Annales des mines « Réalités industrielles », n°3, août 2021, « Neurotechnologies et innovation responsable » : Cf. <https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles-2021-3.htm>

²⁵ Cf. <https://en.unesco.org/news/unescos-international-bioethics-committee-recommendations> une version provisoire mais plus complète du rapport figure au lien suivant : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378724>

²⁶ Aux États-Unis, la Fondation NeuroRights, présidée par le professeur de neurobiologie à l'Université de Columbia Rafael Yuste, milite aussi en ce sens.

²⁷ La note scientifique de l'Office « Neurosciences et responsabilité de l'enfant » précitée a bien souligné la lenteur de la maturation cérébrale, les capacités cognitives se rapprochant de celles des adultes autour de 16 ans et la maturité psychosociale seulement vers 22-23 ans.

²⁸ Cf. cette analyse juridique de l'avocat Thierry Vallat : <https://www.thierryvallatavocat.com/2021/10/la-premiere-loi-sur-la-protection-des-donnees-neuronales-a-ete-adoptee-le-30-septembre-2021-au-chili.html>

²⁹ Cf. le rapport de l'Office n° 476 (2011-2012) de MM. Alain Claeys et Jean-Sébastien Vialatte, députés, « L'impact et les enjeux des nouvelles technologies d'exploration et de thérapie du cerveau » sur le site du Sénat <https://www.senat.fr/notice-rapport/2011/r11-476-1-notice.html> ainsi que sur le site de l'Assemblée nationale <https://www.assemblee-nationale.fr/13/rap-off/i4469.asp> et, également, la note scientifique de l'Office n° 20 « Neurosciences et responsabilité de l'enfant » par M. Michel Amiel, sénateur (novembre 2019), disponible sur le site du Sénat https://www.senat.fr/fileadmin/Fichiers/Images/opecest/quatre_pages/OPECST_2019_0090_note_neurosociences.pdf et sur le site de l'Assemblée nationale https://www2.assemblee-nationale.fr/content/download/181379/1817000/version/3/file/OPECST_2019_0090_note_neurosociences.pdf

³⁰ Parmi l'ensemble des industries, le cas de celles du transport et de l'automobile peuvent notamment être évoquées, car elles développent d'ores et déjà des solutions de neurotechnologies pour leurs futurs produits.

Personnes consultées

Conseil scientifique de l'OPECST

- M. Raja Chatila, professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie, ancien directeur de l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR – Sorbonne Université)
- M. Béchir Jarraya, neurochirurgien à l'hôpital Foch de Suresnes et professeur des universités (PU-PH) à l'Université Versailles-Paris-Saclay, chercheur à NeuroSpin-CEA Saclay, membre de l'Académie de médecine
- M. José-Alain Sahel, membre de l'Académie des sciences, ancien directeur de l'Institut de la vision (INSERM, CNRS, Université Pierre-et-Marie-Curie, Hôpital des Quinze-Vingts, mairie de Paris, région Île-de-France et six entreprises), clinicien-chercheur dans le domaine de la vision
- M. Hervé Chneiweiss (ancien membre du conseil scientifique de l'Office), directeur de recherches au CNRS, directeur du laboratoire de neurosciences de Paris-Seine (Inserm/CNRS/UPMC), neurologue à l'hôpital de la Pitié Salpêtrière, président du comité d'éthique de l'Inserm et du comité de bioéthique de l'Unesco, ancien membre du comité consultatif national d'éthique (CCNE)

Institutions

Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI)

- M. Pascal Maigné, chargé de mission, délégué pour la France au groupe de travail de l'OCDE sur « l'éthique des neurotechnologies »

Académie des sciences

- M. Yves Agid, neurologue et professeur émérite des universités (PU-PH) à l'Université Pierre et Marie Curie, membre fondateur et ancien directeur scientifique de l'Institut du Cerveau, ancien directeur à l'Inserm et ancien membre du Comité consultatif national d'éthique(CCNE)

-
- M. Alim-Louis Benabid, neurochirurgien et professeur des universités (PU-PH), fondateur et ancien président jusqu'en 2021 de Clinatex (CEA, Inserm, CHU et université de Grenoble)
 - M. Stanislas Dehaene, professeur au Collège de France, directeur chez NeuroSpin, unité mixte INSERM-CEA, président du conseil scientifique de l'Éducation nationale

Académie nationale de médecine

- M. André-Raymond Ardaillou, ancien secrétaire perpétuel de l'Académie, néphrologue (PU-PH)
- M. Bernard Biouac, ancien député, neurobiologiste (PU-PH), ancien directeur scientifique adjoint du CNRS, ancien responsable des neurosciences du CNRS, ancien directeur de l'ITMO neurosciences (Institut Thématique Multi-Organismes) et de l'Institut des Neurosciences de Bordeaux

Académie des technologies

- M. Bruno Jarry, ancien Président de l'Académie des technologies, administrateur de l'IFPEN, ancien conseiller du président de l'Institut Curie, ancien vice-président du groupe Lafarge, ancien directeur R&D du groupe Amylum, ancien directeur scientifique du groupe Tate & Lyle, ancien directeur de l'École supérieure de biotechnologie de Strasbourg

Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM)

- M. Frederic Dittenit, directeur adjoint des affaires juridiques et réglementaires
- M. Pascal Di Donato, chef de produit neurologie

Ambassade de France aux États-Unis

- Mme Mireille Guyader, conseillère pour la science et la technologie, Washington
- M. Jean-Baptiste Bordes, attaché pour la science et la technologie, San Francisco
- M. Karim Belarbi, attaché pour la science et la technologie, Los Angeles
- M. Julian Muller, chargé de mission auprès de la conseillère scientifique, Washington

Chercheurs

Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

- M. Luc Buée, directeur de Recherche au CNRS, président de la Société française des neurosciences, directeur du centre de recherche « Lille Neurosciences & Cognition »
- M. Bernard Poulain, directeur adjoint de l'Institut des sciences biologique du CNRS en charge des neurosciences et de la cognition
- M. Xavier Briffault, chargé de recherche au CNRS, centre de recherche médecine, sciences, santé, santé Mentale et société
- M. Luc Estebanez, chargé de recherche au CNRS, Institut des neurosciences Paris-Saclay
- Mme Camille Jeunet, chargée de recherche au CNRS, Institut de neurosciences cognitive et intégratives d'Aquitaine
- M. Nathanaël Jarrassé, chargé de recherche au CNRS, Institut des systèmes intelligents et de robotique (ISIR – Sorbonne Université)

Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria)

- M. Jean-Frédéric Gerbeau, directeur général délégué à la science
- Mme Sandrine Mazetier, directrice des affaires publiques
- M. Frédéric Alexandre, directeur de recherche Inria et chercheur visiteur chez Microsoft
- Mme Christine Azevedo-Coste, directrice de recherche Inria, responsable de l'équipe-projet Camin
- M. David Guiraud, directeur de recherche Inria et mis à disposition dans l'entreprise Neurinnov en tant que directeur scientifique
- M. Anatole Lecuyer, directeur de recherche Inria, responsable de l'équipe-projet Hybrid
- M. Fabien Lotte, directeur de recherche Inria, équipe-projet Potioc
- M. Pierre-Yves Oudeyer, directeur de recherche Inria, responsable de l'équipe Flowers
- M. Théodore Papadopoulo, directeur de recherche Inria, responsable de l'équipe-projet Athena
- Mme Claire Cury, chargée de recherche Inria, équipe-projet Empenn
- M. Fabrizio De Vico Fallani, chargé de recherche Inria, équipe-projet Aramis

Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm)

- M. Philippe Arhets, directeur de l'Inserm pour les États-Unis et le Canada
- M. Christophe Bernard, directeur de recherches à l'Inserm, directeur de l'Institut de neurosciences des systèmes
- M. Etienne Hirsch, directeur de recherche à l'Inserm, ancien président de la Société française des neurosciences
- Mme Agnès Roby-Brami, directrice de recherche à l'Inserm

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

- M. Pierre Magistretti, président de Clinatex (CEA, Inserm, CHU et université de Grenoble), professeur de neurosciences au Brain Mind Institute, École polytechnique fédérale de Lausanne
- M. Bertrand Thirion, directeur de recherche Inria, délégué scientifique du centre Inria de Saclay, responsable de l'équipe-projet Parietal de NeuroSpin (CEA-Inria)
- M. Philippe Vernier, directeur de recherches au CNRS, directeur de l'Institut des sciences du vivant Frédéric Joliot (CEA-Saclay), fondateur de l'Institut des Neurosciences Paris-Saclay (NeuroPSI – CNRS/Université Paris-Saclay)
- M. Guillaume Charvet, directeur du laboratoire de développement des dispositifs médicaux chez Clinatex (CEA, Inserm, CHU et université de Grenoble)

Institut de la Vision

- M. Serge Picaud, directeur de recherche à l'INSERM, directeur de l'Institut de la Vision (INSERM, CNRS, Université Pierre-et-Marie-Curie, Hôpital des Quinze-Vingts, mairie de Paris, région Île-de-France et six entreprises)

Institut du Cerveau

- M. Antoni Valéro-Cabré, directeur de recherche au CNRS, Institut du Cerveau
- Mme Chloé Stengel, chercheuse en post-doctorat, Institut du Cerveau

Universités et hôpitaux universitaires

- M. Michel Baudry, professeur à Western University Health Sciences-California
- M. Emmanuel Hirsch, professeur d'éthique médicale à la faculté de médecine de l'université Paris-Saclay, directeur de l'Espace national de réflexion éthique sur les maladies neurodégénératives et de l'Espace de réflexion éthique de la région Île-de-France
- M. Renaud Jardri, pédopsychiatre et professeur des universités (PU-PH), CHU de Lille, responsable de l'équipe "Plasticity & Subjectivity" du centre « Lille Neuroscience & Cognition »
- M. Marc Ferro, chercheur à l'université de Stanford et entrepreneur
- Mme Isabelle Mosnier, chef de service adjoint du service ORL de l'Hôpital universitaire de la Pitié Salpêtrière, responsable de l'unité fonctionnelle implants auditifs, centre référent pour les implants cochléaires, directrice du centre de recherche en audiologie adulte
- M. Yann Nguyen, chirurgien ORL et professeur des universités (PU-PH), service ORL de l'Hôpital universitaire de la Pitié-Salpêtrière
- Mme Nina Miolane, assistant professor à l'université de Californie à Santa Barbara (UCSB), chercheur à l'université de Stanford
- Mme Sonia Pujol, assistant professor et chercheuse à la Harvard Medical School (Brigham & Women's Hospital/HMS)

Entreprises

France Biotech, association des entreprises françaises en biotechnologies et innovation en santé

- M. Franck Mouthon, président
- M. Olivier Chabanon, délégué général
- Mme Constance Montazel, chargée des relations institutionnelles et des affaires publiques

Avocats

- M. Roberto Andorno, avocat, professeur associé à la Faculté de droit de l'université de Zurich, spécialiste de bioéthique et de neurotechnologies
- M. Alain Bensoussan, avocat, spécialiste des technologies (intelligence artificielle, robotique et neurosciences)
- M. Éric Bonnet, avocat au cabinet d'Alain Bensoussan
- M. Raphaël Liotier, avocat au cabinet d'Alain Bensoussan
- M. Thierry Vallat, avocat, spécialiste des neurotechnologies