

AVIS 150⁺ AVIS 10⁺

Interfaces cerveau-
machine et autres
neurotechnologies
numériques :
questions d'éthique

ccne.

COMITÉ CONSULTATIF NATIONAL
D'ÉTHIQUE POUR LES SCIENCES
DE LA VIE ET DE LA SANTÉ

ccne.n

COMITÉ CONSULTATIF NATIONAL
D'ÉTHIQUE DU NUMÉRIQUE

AVIS 150 du CCNE AVIS 10 du CCNEN

**Interfaces cerveau-machine et autres neurotechnologies
numériques : questions d'éthique**

Avis adopté le 12 février 2026 par les membres présents lors de l'assemblée plénière du CCNEN.

Avis adopté le 19 février 2026 par les membres présents lors de l'assemblée plénière du CCNE.

Comment citer cet avis :

Interfaces cerveau-machine et autres neurotechnologies numériques : questions d'éthique.
Avis commun du CCNE et CCNEN, Avis 150 du CCNE, Avis 10 du CCNEN. Février 2026.

Interfaces cerveau-machine et autres neurotechnologies numériques : questions d'éthique

Table des matières

| | |
|--|----|
| Synthèse générale et recommandations | 6 |
| 1. Introduction | 11 |
| 1.1. État des neurotechnologies en Europe et dans le monde | 12 |
| 1.1.1. Contexte du développement des neurotechnologies numériques | 12 |
| 1.1.2. Documents existants relatifs à l'encadrement des neurotechnologies | 13 |
| 1.1.3. Le contexte international du développement des neurotechnologies..... | 14 |
| 1.2. Points d'attention et repères éthiques | 15 |
| 2. Présentation des neurotechnologies numériques et de leurs usages | 16 |
| 2.1. Les interfaces cerveau-machine et dispositifs de mesure et de modification de l'activité cérébrale..... | 16 |
| 2.2. Les données recueillies | 18 |
| 2.2.1. Les données neurales et leur association avec des données non neurales..... | 18 |
| 2.2.2. Caractère identifiant des données neurales | 20 |
| 2.3. Les principaux usages actuels ou envisagés..... | 20 |
| 2.3.1. Usages médicaux | 20 |
| 2.3.2. Usages non médicaux | 23 |
| 3. Les questions d'éthique posées par les neurotechnologies numériques | 25 |
| 3.1 Introduction | 25 |
| 3.2. Questions d'éthique liées au traitement des données neurales | 26 |
| 3.2.1. L'analyse des données permettant d'inférer des états mentaux | 26 |
| 3.2.2. Cybersécurité | 29 |
| 3.2.3. Les limites du consentement éclairé | 30 |
| 3.3. Questions d'éthique liées à la recherche..... | 31 |
| 3.4. Questions d'éthique liées à l'utilisation médicale | 33 |
| 3.4.1. Bienfaisance et non-malfaisance | 33 |
| 3.4.2 Consentement relatif à l'acte médical | 34 |
| 3.4.3. Équité d'accès | 35 |
| 3.5. Questions d'éthique liées à l'utilisation à des fins d'« augmentation » | 35 |
| 3.5.1. Désir d'augmentation des performances et arguments infondés | 35 |
| 3.5.2. Utilisation de neurotechnologies numériques en dehors d'indications médicales | 37 |
| 3.5.3. Questions d'éthique liées aux usages en milieu professionnel | 38 |

| | |
|--|----|
| 3.5.4 Questions d'éthique liées aux autres usages non médicaux | 40 |
| 3.6. Questions d'éthique relatives à l'autonomie et à l'intégrité de la personne..... | 41 |
| 3.6.1. Questions d'éthique liées à la perturbation de l'identité et de l'agentivité | 41 |
| 3.6.2. Questions d'éthique liées à la modification des comportements | 42 |
| 3.7. Cas particulier du cerveau en développement : les enfants et les adolescents | 45 |
| 3.8. Neurotechnologies numériques et droit | 47 |
| 3.8.1. Questions liées à la discrimination et à la responsabilité en droit | 47 |
| 3.8.2. Faut-il reconnaître de nouveaux droits relatifs au système nerveux ?..... | 48 |
| 4. Conclusions | 49 |
| Glossaire | 52 |
| Annexes | 58 |
| Annexe 1 Aperçu scientifique et technique des neurotechnologies | 58 |
| Annexe 1-1 Aperçu historique | 58 |
| Annexe 1-2 Les méthodes de mesure de l'activité cérébrale..... | 60 |
| A1-2.1. Les interfaces cerveau-machine invasives..... | 60 |
| A1-2.2. Les interfaces cerveau-machine non-invasives | 61 |
| A1-2.3. Les informations renseignant indirectement sur l'activité cérébrale | 61 |
| Annexe 1-3 Les méthodes de modification de l'activité cérébrale | 62 |
| A1-3.1. La stimulation cérébrale profonde (SCP)..... | 62 |
| A1-3.2. Stimulation cérébrale non-invasive..... | 63 |
| A1-3.3. <i>Neuro-feedback</i> et stimulations par canaux sensoriels naturels..... | 64 |
| A1-3.4. Techniques permettant la stimulation ou la lésion cérébrale en profondeur sans franchissement de la peau..... | 64 |
| A1-3.5. Limites et difficultés techniques des neurotechnologies numériques | 64 |
| Annexe 1-4 Informations issues de la recherche expérimentale chez l'animal..... | 65 |
| A1-4.1. Méthodes actuelles en recherche expérimentale..... | 65 |
| A1-4.2. Autostimulation intracrânienne et circuits de récompense..... | 67 |
| Annexe 2 Personnes auditionnées | 69 |
| Annexe 3 Composition du groupe de travail | 70 |
| Annexe 4 Références bibliographiques | 71 |

Synthèse générale et recommandations

Cet avis résulte du travail commun du *Comité consultatif national d'éthique pour les Sciences de la vie et de la santé (CCNE)* et du *Comité consultatif national d'éthique du numérique (CCNEN)*, initié avec le *Comité national pilote d'éthique du numérique (CNPEN)* qui l'a précédé¹. Il porte sur les neurotechnologies numériques, qui permettent de mesurer, d'analyser et de moduler l'activité du système nerveux, et notamment sur les interfaces cerveau-machine, qui génèrent la réponse d'une machine à partir de l'activité cérébrale.

Le développement des neurotechnologies découle des progrès relatifs à la compréhension des mécanismes cérébraux, aux technologies des dispositifs d'interface, ainsi qu'aux méthodes d'analyse des données collectées. Certaines neurotechnologies nécessitent l'implantation de matériel et sont dites invasives, de même que les méthodes qui induisent des lésions intracérébrales sans ouverture de la peau. Les autres méthodes sont dites non-invasives. La quasi-totalité des neurotechnologies utilise des technologies du numérique, dont des techniques d'intelligence artificielle.

En médecine, les neurotechnologies numériques permettent d'améliorer les symptômes de certaines affections neurologiques, psychiatriques ou sensorielles, ou de pallier les déficits qu'elles entraînent. Elles offrent des possibilités nouvelles à certains patients ainsi qu'à des personnes en situation de handicap. Au-delà du domaine médical, ces technologies pourraient être utilisées dans le contexte professionnel, l'éducation ou les loisirs, bien que les bénéfices supposés et les risques potentiels soient incertains et les conséquences individuelles et collectives très mal connues. Comme d'autres technologies émergentes, elles suscitent des espoirs, des intérêts industriels et commerciaux, des craintes et de nombreuses interrogations.

Dans les réflexions sur les neurotechnologies numériques, il est essentiel de tenir compte du fait que le cerveau est l'organe qui permet la pensée, la vie psychique et tout ce qui constitue la personne humaine. Les connaissances scientifiques sont encore très parcellaires quant à la signification exacte de ce qui est interprété à partir des données recueillies et aux conséquences d'actions ciblées sur le cerveau. Les bénéfices réels, comme les risques, pour les personnes et pour la société, doivent faire l'objet d'une attention permanente. Les questions d'éthique spécifiques aux neurotechnologies numériques découlent de leur capacité potentielle à interpréter ou à modifier directement l'activité du cerveau. Elles mettent ainsi en jeu la dignité humaine, l'autonomie, la liberté de pensée et le respect de la vie privée, ainsi que le respect de la diversité et de l'équité, la non-discrimination et l'inclusion. Des questions particulières se posent si des applications sont envisagées hors indications médicales, alors que le bénéfice pour les personnes est, au mieux, très incertain. Enfin, la plasticité et la fragilité considérables du système nerveux en développement doivent conduire à protéger particulièrement les sujets jeunes, enfants ou adolescents, des effets délétères potentiels des neurotechnologies numériques, qu'ils soient directs ou indirects, à court ou à long terme.

Il est important que le grand public prenne conscience des enjeux du développement des neurotechnologies numériques. Les conséquences de leur généralisation potentielle, alors que la communication dans ce domaine peut faire naître des espoirs et donner une impression d'innocuité,

¹ Les avis du CNPEN publiés entre 2019 et 2024 portent les numéros 1 à 9. Le CCNEN ayant été créé en 2024 dans le prolongement du CNPEN, ses avis sont numérotés dans la continuité de ceux du CNPEN : ce premier avis du CCNEN porte donc le numéro 10.

doivent être analysées. Des débats associant des experts de la médecine, des neurosciences, du numérique, des sciences humaines et sociales, du droit et un public large doivent être encouragés et s'appuyer sur des recherches de qualité. Au regard des évolutions rapides du domaine, une réévaluation régulière, par exemple tous les cinq ans en lien avec les révisions de la loi de bioéthique, devrait permettre d'adapter les mesures aux avancées de ces technologies et de la connaissance de leurs impacts.

Cet avis place les neurotechnologies dans leur contexte (Partie 1), en fait une description succincte (Partie 2 et Annexe 1) et présente les arguments qui aboutissent à des recommandations (Partie 3). Dans la Partie 3, la discussion porte successivement sur :

- le traitement des données neurales, qui concernent directement ou indirectement la structure ou l'activité du système nerveux, avec des questions relatives à leur caractère identifiant et au consentement à leurs usages, à la sûreté de fonctionnement et à la cybersécurité des dispositifs de traitement ;
- les protocoles de recherche dans le domaine des neurotechnologies numériques, qu'ils soient ou non à visée médicale ;
- les usages médicaux des neurotechnologies numériques, au regard des principes de bienfaisance et de non-malfaisance, d'équité d'accès aux soins et de consentement ;
- les usages non-médicaux des neurotechnologies numériques visant l'« augmentation » de performances en contexte professionnel, sportif, ludique, ou dans des activités à enjeux financiers, ou visant à l'amélioration du « bien-être » ;
- de manière transversale, les questions relatives à la perturbation de l'identité et de l'agentivité et à la modification des comportements, ainsi qu'aux risques de dépendance et de pressions sociales ;
- le cas particulier du cerveau jeune, en développement, et des usages dans le domaine de l'éducation ;
- les questions juridiques particulières soulevées par ces technologies.

Liste des recommandations

1- *Recommandations à portée générale*

R1.1 – États-généraux de la bioéthique

- Mettre les neurotechnologies numériques à l'ordre du jour des États-généraux de la bioéthique et les inclure dans la préparation de la révision de la loi de bioéthique.

R1.2 – Information et formation

- Encourager la mise en place de procédures d'information et de formation destinées à familiariser les professionnels concernés, les patients, comme le grand public, aux bases des neurotechnologies numériques, à leur intérêt, leurs limites et leurs risques.

2- *Recommandations relatives aux données neurales*

R2.1 – Les données neurales comme données à caractère personnel sensibles

- Considérer toutes les données neurales comme des données à caractère personnel sensibles, et potentiellement directement identifiantes, au sens du Règlement général pour la protection des données (RGPD).

R2.2 – Traitement local des données neurales

- Privilégier le traitement local [*c'est-à-dire sans transmission à distance*] des données neurales, à la fois pour des raisons de protection des données à caractère personnel et de minimisation de l'empreinte environnementale.

R2.3 – Sûreté de fonctionnement des dispositifs de traitement des données neurales

- Évaluer régulièrement les taux d'erreurs des dispositifs qui déclenchent des réponses en fonction de l'analyse de données neurales. Prévoir des mécanismes d'échappement ou de secours d'urgence, tout particulièrement si les réponses déclenchées automatiquement par l'analyse de données neurales sont susceptibles d'avoir des conséquences dangereuses.

R2.4 – Cybersécurité

- Analyser la cybersécurité des interfaces cerveau-machine dès la conception de prototypes.
- Équiper les interfaces cerveau-machine invasives de dispositifs de cybersécurité eux-mêmes vérifiés et certifiés par des organismes qualifiés, qui garantissent des réglages à distance sécurisés, et limitent les risques de prises de contrôle indésirées et les cyberattaques.

R2.5 – Consentement à l'utilisation des données neurales

- Dans tous les cas d'usage des neurotechnologies numériques, veiller à ce que les informations fournies à la personne concernée soient simples, claires et adaptées.
- En contexte médical, mettre en place des processus de consentement explicite pour toutes les utilisations secondaires des données neurales.
- Hors contexte médical, recueillir explicitement le consentement de la personne concernée pour l'utilisation de ses données neurales.
- Interdire l'utilisation de données neurales pour le ciblage à visée commerciale et plus généralement, pour l'alimentation d'algorithmes de recommandation quels qu'en soient les objectifs.
- Encourager les recherches sur le recueil de consentement à l'utilisation des données neurales pour renforcer la protection des personnes concernées.

3- Recommandations relatives à la recherche

R3.1 – Inclusion des patients dans les recherches

- Pour les recherches relatives aux neurotechnologies numériques à visée médicale, inclure des représentants des patients dans la conception du protocole, en étant attentif à leur diversité.

R3.2 – Examen et suivi éthique

- Pour toute recherche impliquant des neurotechnologies numériques chez des personnes humaines, à vocation médicale ou non, dans un cadre public ou privé, exiger systématiquement un avis favorable d'un Comité de protection des personnes (CPP), en conformité avec la législation. Encourager les CPP à faire appel à des experts des neurotechnologies numériques.
- Mettre en place un suivi éthique de ces recherches parallèlement au suivi technique.

4- Recommandation relative aux usages médicaux

R4 – Indications, information du patient

- Limiter les usages médicaux des neurotechnologies numériques à des indications clairement définies, répondant à des besoins reconnus par le consensus scientifique et validés par la Haute Autorité de Santé.
- S’assurer que le patient a reçu, sous une forme simple et adaptée, une information complète et précise au sujet de l’intervention envisagée, y compris concernant les incertitudes et les risques qui y sont liés.
- Développer des procédures pour aider les patients porteurs d’un dispositif neurotechnologique à faire face à la cessation d’activité d’un fournisseur ou à d’autres aléas ayant des conséquences sur la continuité du traitement.

5- Recommandations relatives aux usages non médicaux

R5.1 – Interdiction des dispositifs invasifs en dehors d’indications médicales

- En dehors d’indications médicales, interdire l’utilisation des dispositifs neurotechnologiques invasifs (interfaces cerveau-machine, dispositifs de stimulation), ainsi que des techniques de lésion intracérébrale sans ouverture de la peau.

R5.2 – Contrôles des dispositifs non-invasifs

- Considérer que tout dispositif non-invasif de modulation ou de stimulation physique directe de l’activité cérébrale (par des courants électriques, champs magnétiques, mais aussi des ultrasons ou autres processus similaires) sont des dispositifs médicaux, conformément à la réglementation européenne, en prévoyant les modalités appropriées de contrôle des ventes à distance (internet).

R5.3 – Usages en milieu professionnel

- Consulter les instances représentatives du personnel au sujet de l’utilisation de données neurales à des fins d’observation et de suivi des employés sur le lieu de travail, réaliser des expérimentations préalables et des études d’impact, et comparer avec d’autres solutions possibles.
- Proposer que l’usage de données neurales pour l’embauche, l’évaluation, la promotion, la sanction ou le licenciement d’employés soit considéré comme discriminatoire, au sens de l’article 225 du Code pénal, même si elles ne concernent pas l’état de santé de la personne.
- Encadrer les usages des neurotechnologies numériques en milieu professionnel, le cas échéant au regard des systèmes d’intelligence artificielle interdits et à « haut risque » tels que définis par le Règlement européen sur l’intelligence artificielle.

R5.4 – Usages dans les activités sportives

- Encadrer l’utilisation des données neurales lors des compétitions sportives et préciser la place des techniques de stimulation cérébrale parmi les procédés d’augmentation artificielle des performances physiques.

R5.5 – Usages impliquant des enjeux financiers

- Interdire les dispositifs fondés sur l'induction de réponses numériques à partir d'enregistrements d'activité cérébrale dans le contexte des jeux de hasard, de paris avec enjeux monétaires, d'achats, d'enchères à distance, de gestion de flux financiers, et plus généralement pour toute activité de prise de décision ayant des conséquences financières pour l'utilisateur.

R5.6 – Usages visant à améliorer le « bien-être »

- Soumettre les neurotechnologies numériques proposées pour améliorer le « bien-être » à des contrôles de qualité et d'innocuité.

R5.7 – Modification des comportements

- Réglementer et encadrer strictement la mise sur le marché des dispositifs de neurotechnologie numérique susceptibles d'influencer le comportement ou le jugement de la personne concernée, qu'ils incluent ou non des techniques d'intelligence artificielle.
- Pour chaque type de neurotechnologie numérique susceptible d'être mis sur le marché, déterminer les conséquences de la privation du dispositif en particulier après usage prolongé.

6- Recommandation relative aux usages chez les enfants et les adolescents

R6 - Enfants et adolescents

- En dehors de la recherche ou d'indications médicales, interdire l'utilisation des neurotechnologies numériques chez les enfants et adolescents, y compris dans le cadre éducatif et les loisirs.

7- Recommandation relative au droit

R7 – Modification d'articles dans le Code pénal

- Inclure les données neurales dans les motifs de discrimination, au sens de l'article 225-1 du Code pénal, que ces données soient en rapport ou non avec l'état de santé.
- Remplacer la phrase de l'article 225-3 du Code pénal : « ou de données issues de techniques d'imagerie cérébrale » par « ou de données issues de techniques d'imagerie cérébrale et autres techniques de mesure de l'activité cérébrale ».

1. Introduction

Les neurotechnologies « font référence aux appareils, systèmes et procédures – englobant à la fois le matériel et les logiciels – qui permettent de mesurer directement le système nerveux, d’y accéder, de le surveiller, de l’analyser, d’en prévoir l’activité ou de la moduler, afin de comprendre, influencer, restaurer ou anticiper sa structure, son activité et sa fonction. »²

Les neurotechnologies sont issues de la rencontre entre la médecine, les neurosciences, les sciences de l’ingénieur et les sciences du numérique. Leur développement actuel découle des progrès qui ont été réalisés en parallèle sur la compréhension des mécanismes cérébraux, sur la technologie des dispositifs d’interface (miniaturisation, matériaux biocompatibles, sensibilité des capteurs, etc.) et sur les méthodes d’analyse des données collectées par des systèmes d’intelligence artificielle, en particulier fondés sur l’apprentissage automatique. La quasi-totalité des neurotechnologies fait ainsi appel aux technologies du numérique. Les principales technologies et leurs applications actuelles ou proposées sont présentées brièvement dans la deuxième partie de l’avis et dans l’Annexe 1. Les interrogations éthiques spécifiques qui en découlent sont liées à leurs fonctionnalités d’interprétation ou de modification directe de l’activité du cerveau qui permettent d’accéder, au moins en principe, au cœur de ce qui constitue la personne humaine³.

Toutes ces technologies évoluent très rapidement et font régulièrement l’actualité avec des résultats spectaculaires dont la présentation élude parfois le contexte précis dans lequel ils ont été obtenus. Comme d’autres technologies émergentes, elles suscitent des espoirs, des intérêts industriels et commerciaux, des craintes et de nombreuses interrogations. Des applications possibles à un large public nourrissent aussi bien l’imagination que les inquiétudes.

En médecine, les neurotechnologies fournissent déjà des approches nouvelles pour améliorer les symptômes de certaines affections neurologiques, psychiatriques ou sensorielles ou pour pallier les déficits qu’elles entraînent⁴. Elles sont une source d’espoir pour des patients souffrant d’affections handicapantes. Mais au-delà de cette dimension médicale, certains y voient une possibilité de dépassement de la condition humaine avec un potentiel commercial considérable. Ainsi les neurotechnologies pourraient être utilisées dans la vie professionnelle, l’éducation ou les loisirs même si les bénéfices supposés et les risques potentiels sont incertains et les conséquences individuelles et collectives très mal connues.

Il faut souligner d’emblée que l’utilisation d’un langage simplifié ou emphatique dans la communication relative aux neurotechnologies favorise une certaine confusion. Les dispositifs disponibles ou envisageables dans un avenir proche ne permettront probablement pas de « lire les pensées » dans le sens courant de cette phrase. Les possibilités nouvelles, aussi extraordinaires qu’elles paraissent, restent encore très limitées. Malgré des similarités superficielles, le cerveau ne fonctionne pas comme un ordinateur et il n’est pas envisageable dans l’état actuel des connaissances de le connecter directement à un système numérique pour « télécharger » la mémoire ou les pensées ou lui transmettre des informations complexes. Nous centrons donc la réflexion sur les résultats avérés et les applications disponibles, proposées ou envisageables à court ou moyen terme.

² *Recommandation sur l’éthique des neurotechnologies*, adoptée à la Conférence Générale de l’UNESCO le 12 Novembre 2025.

³ Cet avis concerne uniquement les questions d’éthique liées aux neurotechnologies chez la personne humaine. Les informations obtenues à partir des recherches chez l’animal sont évoquées dans l’Annexe 1-4.

⁴ Quelques exemples sont donnés dans la section 2.3.1 et l’Annexe 1-3.

Les enjeux éthiques des neurotechnologies sont nombreux et ont été notamment mis en avant dans les recommandations de l'UNESCO sur le sujet¹. Ces enjeux touchent à la dignité de la personne humaine, fondement des droits humains universels et des libertés fondamentales, au respect de l'autonomie, à la liberté de pensée et au respect de la vie privée, qui implique la protection des données recueillies. Enfin la mise en œuvre de neurotechnologies pose des questions liées au respect de la diversité et de l'équité, à la non-discrimination et à l'inclusion. Ces différents points sont développés dans la troisième partie de cet avis.

Cet avis résulte du travail commun du *Comité consultatif national d'éthique (CCNE) pour les Sciences de la vie et de la santé* et du *Comité consultatif national d'éthique du numérique (CCNEN)*, initié avec le *Comité national pilote d'éthique du numérique (CNPEN)* qui l'a précédé. L'avis concerne les neurotechnologies numériques, et, plus particulièrement **les interfaces cerveau-machine⁵ et les diverses technologies apparentées de lecture et de modification de l'activité cérébrale**. Le champ de réflexion de cet avis n'inclut pas d'autres approches qui peuvent être associées, et qui soulèvent des questions en partie similaires comme, par exemple, les modèles mathématiques ou informatiques de fonctionnement du cerveau (par exemple les jumeaux numériques) ou les interactions entre les humains et les ordinateurs à un niveau plus intégré, qui ne court-circuitent pas les organes des sens ou de la motricité. Certains de ces sujets ont déjà fait l'objet d'avis du CNPEN⁶ et du CCNE. Les approches pharmacologiques⁷ ou biotechnologiques qui visent à modifier ou à reproduire *in vitro* le fonctionnement du cerveau ne sont pas non plus incluses dans cet avis. Les applications des neurotechnologies aux affections psychiatriques⁸ sont discutées dans cet avis à la lumière des progrès récents.

1.1. État des neurotechnologies en Europe et dans le monde

1.1.1. Contexte du développement des neurotechnologies numériques

Le développement actuel des neurotechnologies a pour origine les approches conçues à des fins diagnostiques et thérapeutiques. Un rapide survol de ces méthodes et de leur historique est présenté en Annexe 1 pour permettre de mieux situer les développements en cours.

Actuellement on peut discerner deux grandes motivations pour les recherches et les développements dans le domaine des neurotechnologies. D'une part, des besoins médicaux importants puisque les « maladies du cerveau », un terme générique fréquemment utilisé pour désigner l'ensemble des maladies neurologiques, psychiatriques et des organes des sens, représentent en Europe environ un tiers du fardeau médical total, humain et financier⁹. Or dans de nombreux cas, les traitements sont inexistantes ou insuffisants. De plus, lorsque les cellules du système nerveux, en particulier les neurones, sont détruites, leur perte est irréversible, entraînant des déficits et des handicaps définitifs qui peuvent être très sévères. De grands espoirs sont suscités par les neurotechnologies, qui améliorent déjà les symptômes de certaines de ces maladies ou suppléent en partie à la fonction des circuits détruits. D'autre part, les neurotechnologies pourraient constituer un

⁵ Les interfaces cerveau-machine ou, selon l'expression anglaise, les interfaces cerveau-ordinateur (*brain-computer interface* – BCI) désignent des dispositifs conçus pour déchiffrer une activité cérébrale afin de générer la réponse d'une machine et, par exemple, restaurer des possibilités de communication pour une personne paralysée. *Neurotechnology and society strengthening responsible innovation in brain science*. OECD Science, technology and innovation policy papers. November 2017 no. 46

⁶ Avis n°3 : « [Agents conversationnels : enjeux d'éthique](#) », 2021 ; Avis n°7 « [Systèmes d'intelligence artificielle générative : enjeux d'éthique](#) », 2023 ; Avis n°9 « [Métavers : enjeux d'éthique](#) », 2024.

⁷ Voir Avis n°122 du CCNE « [Recours aux techniques biomédicales en vue de « neuro-amélioration » chez la personne non malade : enjeux éthiques](#) », 2013

⁸ Voir Avis n°71 du CCNE « [La neurochirurgie fonctionnelle d'affections psychiatriques sévères](#) », 2002.

⁹ DiLuca M, Olesen J. The cost of brain diseases: a burden or a challenge? *Neuron*. 2014, 82:1205-8. DOI:10.1016/j.neuron.2014.05.044

moyen d'augmenter les capacités humaines¹⁰, ce qui explique l'intérêt d'organisations professionnelles, militaires ou civiles, tentées par la possibilité de renforcer ou de contrôler les capacités de leurs employés. Un autre aspect mis en avant est de faciliter les interactions entre les humains et les machines, par exemple en contrôlant directement les ordinateurs sans avoir besoin des accessoires habituels (clavier, souris). La combinaison de ces motivations, renforcée par l'espoir de nouveaux marchés rentables, irrigue les discours et les développements industriels, non sans créer des confusions dans l'esprit du public. Ceci est bien illustré par le texte mis en exergue sur le site d'un industriel états-unien du domaine : « Notre mission : créer une interface généralisée avec le cerveau pour restaurer l'autonomie de ceux qui ont des besoins médicaux insatisfaits aujourd'hui et pour libérer le potentiel humain demain »¹¹. Ces visions soulèvent des questions éthiques détaillées dans les sections 3.5 et 3.6.

1.1.2. Documents existants relatifs à l'encadrement des neurotechnologies

Au cours de la dernière décennie, de grands programmes de recherche collaboratifs dans le domaine des neurosciences ont vu le jour comme *Human Brain Project*¹² en Europe, *BRAIN Initiative (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies)*¹³ aux États-Unis, puis d'autres notamment en Chine¹⁴. Ces projets ambitieux, très axés sur les dimensions technologiques, ont stimulé les réflexions éthiques¹⁵ et la création, dans plusieurs pays, de départements, de comités ou d'instituts de neuroéthique dont les liens d'intérêt avec le secteur privé mériteraient souvent d'être plus clairement affichés. Des comités d'experts de grands organismes internationaux se sont saisis du sujet et ont publié des documents comme ceux de l'OCDE¹⁶ et de l'UNESCO¹⁷ dont le texte a été adopté le 12 novembre 2025 par l'assemblée générale des états membres.

Une démarche « de bas en haut » mettant en pratique les recommandations de l'OCDE, a conduit en 2022 à la rédaction en France d'une *Charte de développement responsable des neurotechnologies*¹⁸. Une démarche similaire a été initiée au niveau européen avec la proposition d'une *Charte Européenne de développement responsable des neurotechnologies* mise en ligne en 2025¹⁹. Ces chartes sont des documents juridiquement non contraignants dont la particularité est d'associer aussi bien des acteurs académiques de la médecine et de la recherche que des sociétés privées qui utilisent ou développent des neurotechnologies et des associations de patients. Ainsi les signataires s'engagent à adopter un ensemble de bonnes pratiques et à respecter des limites, dans l'intérêt public.

¹⁰ D'ailleurs, certains courants, dits « transhumanistes », aux visions plus ou moins radicales, envisagent même une transformation de l'humanité sur la base de diverses technologies. Voir le livre de Gilbert Hottois « Philosophie et idéologies post/transhumanistes » Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 2018.

¹¹ [Neuralink](#) - « Our mission: Create a generalized brain interface to restore autonomy to those with unmet medical needs today and unlock human potential tomorrow ». Cette société se distingue notamment par une certaine réticence à communiquer les détails de ses recherches et à respecter les règles des essais thérapeutiques humains (voir [Neuralink brain chip: advance sparks safety and secrecy concerns](#). Drew L. Nature. 2024, 627:19).

¹² <https://www.humanbrainproject.eu/en/>

¹³ <https://braininitiative.nih.gov/>

¹⁴ China Brain Project: Basic Neuroscience, Brain Diseases, and Brain-Inspired Computing. Poo MM, Du JL, Ip NY, Xiong ZQ, Xu B, Tan T. Neuron. 2016 92:591-6. doi:10.1016/j.neuron.2016.10.050.

¹⁵ Par exemple : Yuste R, Goering S, Arcas BAY, Bi G, Carmena JM, Carter A, Fins JJ, Friesen P, Gallant J, Huggins JE, Illes J, Kellmeyer P, Klein E, Marblestone A, Mitchell C, Parens E, Pham M, Rubel A, Sadato N, Sullivan LS, Teicher M, Wasserman D, Wexler A, Whittaker M, Wolpaw J. Four ethical priorities for neurotechnologies and AI. Nature. 2017 551:159-63. doi:10.1038/551159a ; Global Neuroethics Summit Delegates; Rommelfanger KS, Jeong SJ, Ema A, Fukushi T, Kasai K, Ramos KM, Salles A, Singh I. Neuroethics Questions to Guide Ethical Research in the International Brain Initiatives. Neuron. 2018 100:19-36. doi:10.1016/j.neuron.2018.09.021.

¹⁶ *Neurotechnology and society strengthening responsible innovation in brain science*. OECD Science, technology and innovation policy papers. November 2017 n° 46

¹⁷ *Recommandation sur l'éthique des neurotechnologies*, adoptée à la Conférence Générale de l'UNESCO le 12 Novembre 2025

¹⁸ Voir sur le [site](#) de l'Agence de biomédecine.

¹⁹ Voir sur le [site](#) du European Brain Council.

Dans certains pays comme le Chili, les législateurs ont proposé d'inclure des « neurodroits » dans la constitution²⁰ et l'état du Colorado aux États-Unis a spécifiquement protégé les données neurales (neurodonnées, *Neural Data*)²¹ par une loi votée en 2021²². Récemment, au Canada les « données neuronales » ont été incluses parmi celles qui sont considérées comme « sensibles et doivent faire l'objet d'une meilleure protection »²³.

En France, il n'y a pas aujourd'hui de loi spécifique réglementant les neurotechnologies mais comme beaucoup d'entre elles impliquent la manipulation de données personnelles et l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle, elles doivent respecter les textes réglementaires européens, le *Règlement général sur la protection des données* (RGPD)²⁴ et le *Règlement européen sur l'intelligence artificielle* (AI Act)²⁵, ainsi que la transposition de ces textes dans le droit français. Cependant, la loi de bioéthique (2011) aborde les neurotechnologies dans deux articles, qui restreignent les usages de l'imagerie cérébrale (article 18) et ouvrent la voie à l'interdiction des modifications de l'activité cérébrale si celles-ci présentent un danger grave pour la santé humaine (article 19). Cette distinction traduit la volonté du législateur de distinguer d'une part l'observation du cerveau, qui soulève essentiellement des enjeux juridiques de protection de la vie privée, et d'autre part l'intervention sur le cerveau, qui comporte des risques sanitaires. L'article 18²⁶ protège ainsi la personne contre toute utilisation intrusive des techniques d'imagerie à des fins non médicales ou non scientifiques, en particulier dans le cadre juridique (18-1) et des pratiques discriminatoires (18-2). L'article 19²⁷ s'inscrit dans une logique de précaution face aux technologies susceptibles d'altérer directement l'activité cérébrale et, par conséquent, l'intégrité de la personne humaine.

1.1.3. Le contexte international du développement des neurotechnologies²⁸

Le domaine des neurotechnologies numériques est l'objet de recherches actives en France et en Europe. Des équipes françaises ont par exemple joué un rôle pionnier dans le développement de la stimulation cérébrale profonde (SCP) pour la maladie de Parkinson²⁹ et les troubles obsessionnels-

²⁰ Voir sur le site de l'UNESCO - [Le Chili, pionnier dans la protection des « neurodroits »](#), mars 2022.

²¹ Les données cérébrales, aussi appelées dans un sens plus large des données neurales (ou « neurodonnées ») comprennent tous les paramètres structuraux et fonctionnels qui traduisent les propriétés et l'activité du cerveau. Dans ce texte nous utilisons le terme « données neurales ».

²² *Colorado General Assembly - Protect Privacy of Biological Data*, 2024

²³ Commissariat à la protection de la vie privée du Canada, [Bulletin d'interprétation](#) de La Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques (LPRPDE), 10 février 2026.

²⁴ [Règlement général sur la protection des données](#) (RGPD)

²⁵ [Règlement \(UE\) 2024/1689](#) du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle et modifiant les règlements (CE) n° 300/2008, (UE) n° 167/2013, (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1139 et (UE) 2019/2144 et les directives 2014/90/UE, (UE) 2016/797 et (UE) 2020/1828 (règlement sur l'intelligence artificielle) (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). La situation n'est pas fixée puisque la Commission Européenne a repoussé la mise en œuvre de l'*AI Act* et proposé sa simplification ([Digital Omnibus on AI Regulation Proposal](#)).

²⁶ Article 18 I. – La première phrase de l'article 16-14 du **code civil** est ainsi rédigée : « 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. Le consentement exprès de la personne doit être recueilli par écrit préalablement à la réalisation de l'examen, après qu'elle a été dûment informée de sa nature et de sa finalité. Le consentement mentionne la finalité de l'examen. Il est révoquant sans forme et à tout moment. »

Article 18 II. - La seconde phrase du 1° de l'article 225-3 du **code pénal** est complétée par les mots : « ou de données issues de techniques d'imagerie cérébrale ». Cette modification inclut parmi les discriminations relevant des articles 225-1 et 225-2 « la prise en compte des conséquences sur l'état de santé [...] de données issues de techniques d'imagerie cérébrale ».

²⁷ Article 19 I. – ... le **code de la santé publique** est complété par un article L. 1151-4 ainsi rédigé : « Art. L. 1151-4. – Les 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 peuvent être interdits par décret, après avis de la Haute Autorité de santé. Toute décision de levée de l'interdiction est prise en la même forme. »

²⁸ Un [schéma de la gouvernance européenne](#) en matière de neurotechnologies est proposé par le groupe de réflexion *Centre for Future Generations*.

²⁹ Benabid AL, Pollak P, Louveau A, Henry S, de Rougemont J. Combined (thalamotomy and stimulation) stereotactic surgery of the VIM thalamic nucleus for bilateral Parkinson disease. *Appl Neurophysiol.* 1987 50:344-6. doi:10.1159/000100803. ; Benabid AL, Pollak P, Gross C, Hoffmann D, Benazzouz A, Gao DM, Laurent A, Gentil M, Perret J. Acute and long-term effects of subthalamic nucleus stimulation in Parkinson's disease. *Stereotact Funct Neurosurg.* 1994 62:76-84. doi:10.1159/000098600.

compulsifs sévères³⁰. Néanmoins, la fabrication et la commercialisation des dispositifs de stimulation est surtout le fait de compagnies états-uniennes³¹. La recherche sur les neuroprothèses et les technologies des interfaces cerveau-machine est également un domaine très actif dans plusieurs pays d'Europe avec des résultats précurseurs au niveau mondial pour pallier les paralysies spinales³² ou les troubles de la marche résistants de la maladie de Parkinson³³. Des développements importants ont lieu aux États-Unis, notamment dans le domaine des neuroprothèses vocales³⁴, et en Asie, comme en témoignent des travaux récents³⁵. En Europe, les réticences culturelles et de meilleurs mécanismes de protection des consommateurs ralentissent probablement les développements orientés vers le grand public, qui sont portés notamment par de grandes sociétés de haute technologie, surtout états-uniennes. En ce qui concerne les questions éthiques soulevées par les neurotechnologies, plusieurs réflexions sont en cours, menées notamment par l'*European Group on Ethics in Science and New Technologies*³⁶, l'*Ethikrat*³⁷ en Allemagne et le *Nuffield Council on Bioethics*³⁸ au Royaume-Uni.

1.2. Points d'attention et repères éthiques

Ces points, détaillés dans la partie 3, sont l'objet de l'avis, mais il est utile de les évoquer brièvement préalablement à la description des neurotechnologies numériques. Il faut souligner que de nombreuses interrogations soulevées par ces technologies sont aussi mises en avant depuis longtemps dans d'autres contextes en lien avec les progrès scientifiques et techniques de la médecine, la protection des données personnelles, les risques de manipulation et les influences sur les personnes, et les projets d'augmentation des capacités humaines. Toutefois les neurotechnologies, qui visent à interpréter ou à modifier directement l'activité cérébrale, donnent une dimension et une acuité nouvelles à ces questions éthiques.

La réflexion relative aux neurotechnologies numériques doit se fonder à la fois sur les principes d'éthique biomédicale et sur les principes d'éthique du numérique³⁹. Les interfaces cerveau-machine et les techniques qui visent à modifier l'activité cérébrale questionnent directement le principe

³⁰ Mallet L, Polosan M, Jaafari N, Baup N, Welter ML, Fontaine D, du Montcel ST, Yelnik J, Chéreau I, Arbus C, Raoul S, Aouizerate B, Damier P, Chabardès S, Czernecki V, Ardouin C, Krebs MO, Bardinet E, Chaynes P, Burbaud P, Cornu P, Derost P, Bougerol T, Bataille B, Mattei V, Dormont D, Devaux B, Vérin M, Houeto JL, Pollak P, Benabid AL, Agid Y, Krack P, Millet B, Pelissolo A; STOC Study Group. Subthalamic nucleus stimulation in severe obsessive-compulsive disorder. *N Engl J Med*. 2008 359:2121-34. doi:10.1056/NEJMoa0708514.

³¹ En particulier Medtronic, ainsi qu'Abbott et Boston Scientific.

³² Wagner FB, Mignardot JB, Le Goff-Mignardot CG, Demesmaeker R, Komi S, Capogrosso M, Rowald A, Seáñez I, Caban M, Pirondini E, Vat M, McCracken LA, Heimgartner R, Fodor I, Watrin A, Seguin P, Paoles E, Van Den Keybus K, Eberle G, Schurch B, Pralong E, Becce F, Prior J, Buse N, Buschman R, Neufeld E, Kuster N, Carda S, von Zitzewitz J, Delattre V, Denison T, Lambert H, Minassian K, Bloch J, Courtine G. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *Nature*. 2018 563:65-71. doi:10.1038/s41586-018-0649-2.

³³ Milekovic T, Moraud EM, Macellari N, Moerman C, Raschellà F, Sun S, Perich MG, Varescon C, Demesmaeker R, Bruel A, Bole-Feysot LN, Schiavone G, Pirondini E, YunLong C, Hao L, Galvez A, Hernandez-Charpak SD, Dumont G, Ravier J, Le Goff-Mignardot CG, Mignardot JB, Carparelli G, Harte C, Hankov N, Aureli V, Watrin A, Lambert H, Borton D, Laurens J, Vollenweider I, Borgognon S, Bourre F, Goillandeau M, Ko WKD, Petit L, Li Q, Buschman R, Buse N, Yaroshinsky M, Ledoux JB, Becce F, Jimenez MC, Bally JF, Denison T, Guehl D, Ijspeert A, Capogrosso M, Squair JW, Asboth L, Starr PA, Wang DD, Lacour SP, Micera S, Qin C, Bloch J, Bezaud E, Courtine G. A spinal cord neuroprosthesis for locomotor deficits due to Parkinson's disease. *Nat Med*. 2023 29:2854-65. doi:10.1038/s41591-023-02584-1.

³⁴ Wairagkar M, Card NS, Singer-Clark T, Hou X, Iacobacci C, Miller LM, Hochberg LR, Brandman DM, Stavisky SD. An instantaneous voice-synthesis neuroprosthesis. *Nature*. 2025, 644:145-152. doi:10.1038/s41586-025-09127-3. PMID: 40506548 ; Littlejohn KT, Cho CJ, Liu JR, Silva AB, Yu B, Anderson VR, Kurtz-Miott CM, Brosler S, Kashyap AP, Hallinan IP, Shah A, Tu-Chan A, Ganguly K, Moses DA, Chang EF, Anumanchipalli GK. A streaming brain-to-voice neuroprosthesis to restore naturalistic communication. *Nat Neurosci*. 2025 28:902-12. doi:10.1038/s41593-025-01905-6.

³⁵ Qian Y, Liu C, Yu P, Ran X, Li S, Yang Q, Liu Y, Xia L, Wang Y, Qi J, Zhou E, Lu J, Li Y, Tao TH, Zhou Z, Wu J. Real-time decoding of full-spectrum Chinese using brain-computer interface. *Sci Adv*. 2025, 11:eadz9968. doi:10.1126/sciadv.adz9968.

³⁶ [European Group on Ethics in Science and New Technologies \(EGE\)](https://www.ethikrat.org/en/)

³⁷ <https://www.ethikrat.org/en/>

³⁸ <https://www.nuffieldbioethics.org/>

³⁹ « Bioéthique et éthique du numérique : une hybridation paradoxale » Raja Chatila in Comité national pilote d'éthique du numérique - *Pour une éthique du numérique*. Coordonné par Eric Germain, Claude Kirchner, Catherine Tessier, PUF, février 2022, ISBN 978-2-13-083348-2. Voir également le [Manifeste pour une éthique du numérique](#) du Comité national pilote d'éthique du numérique (CNPEN) et [HLEG Ethics guidelines for a trustworthy AI](#).

d'autonomie de la personne, sa volonté, sa conscience, sa personnalité, sa liberté de pensée, la maîtrise de ses actions (« agentivité »). Ce questionnement est accru si des applications sont envisagées hors indications médicales. En outre, les connaissances scientifiques sont encore très parcellaires quant à la signification exacte de ce qui est interprété à partir des données neurales⁴⁰ et aux risques liés aux effets indirects d'actions ciblées sur une région du cerveau, y compris sur d'autres régions. De ce fait, le consentement « éclairé » est limité par les difficultés à donner à la personne concernée une information claire et complète. L'explication et la traçabilité des phénomènes peuvent également être limitées par la nature même du traitement numérique des signaux cérébraux et de leur analyse en particulier si des techniques d'apprentissage automatique sont mises en œuvre.

La bienfaisance, qui consiste à utiliser les neurotechnologies numériques pour améliorer la qualité de vie d'un patient en compensant des symptômes ou déficits fonctionnels, peut être perçue différemment selon les personnes. En outre, l'évaluation du rapport entre les bénéfices escomptés et les risques potentiels nécessite de disposer de données fiables qui manquent le plus souvent puisqu'il s'agit de technologies en cours de développement. Au-delà de l'approche purement utilitariste, les interfaces cerveau-machine soulèvent la question fondamentale de la définition de la personne humaine et de son autonomie. Si les éléments et les traits les plus intimes de l'activité mentale deviennent accessibles, voire sujets à une influence externe, la notion d'autonomie se détache de son socle physiologique et devient une construction à dominance sociale et juridique. Avec le développement de l'intelligence artificielle, cette évolution peut être rapide et entraîner un changement anthropologique important. Enfin, la gestion des données neurales soulève de nombreuses questions liées à la définition de la vie privée de l'individu.

Ainsi les questions que soulèvent les neurotechnologies numériques interrogent notamment les grands principes d'autonomie, de bienfaisance, de non-malfaisance, de justice, d'explicabilité, de respect de la vie privée, de diversité, et de responsabilité, comme cela est mis en avant dans les recommandations de l'UNESCO⁴¹.

2. Présentation des neurotechnologies numériques et de leurs usages

2.1. Les interfaces cerveau-machine et dispositifs de mesure et de modification de l'activité cérébrale

Les divers types d'interfaces cerveau-machine et les dispositifs de mesure et de modification de l'activité cérébrale sont décrits plus précisément dans l'Annexe 1. Nous n'en présentons ici que les grandes lignes. Il faut souligner d'emblée qu'il s'agit d'un domaine en évolution rapide et que les développements technologiques peuvent apporter des modifications importantes aux approches utilisables ou proposées actuellement. Plusieurs axes permettent de distinguer ces dispositifs sachant qu'un même appareil peut associer plusieurs propriétés. Selon la fonction, on peut distinguer d'une part, **les dispositifs qui mesurent l'activité cérébrale** qui est ensuite analysée et utilisée pour générer des réponses de systèmes informatiques (ce sont des interfaces cerveau-machine au sens strict) et d'autre part, **les dispositifs qui permettent de modifier l'activité cérébrale**. Selon leur localisation et leur mise en place, on oppose les dispositifs invasifs⁴², placés à l'intérieur de la boîte crânienne et les

⁴⁰ Il faut souligner que lorsqu'une activité électrique corticale enregistrée par une interface cerveau machine est utilisée pour piloter une prothèse ou synthétiser une parole, le lien entre les deux est habituellement établi par apprentissage automatique sans qu'il y ait une véritable compréhension de la logique de fonctionnement des circuits neuronaux.

⁴¹ III Valeurs et principes, *Recommandation sur l'éthique des neurotechnologies*, adoptée à la Conférence Générale de l'UNESCO le 12 Novembre 2025.

⁴² On trouve également le terme non-effractif pour désigner ce qui n'implique pas de pénétration à travers le revêtement cutané ou muqueux.

dispositifs non-invasifs qui sont à l'extérieur du corps, sans franchissement de la peau (par exemple casque, bandeau, lunettes, dispositif intra-auriculaire...). Certains parlent de dispositifs « invasifs *a minima* » (*minimally invasive*) lorsqu'il s'agit de dispositifs peu volumineux placés à l'intérieur de vaisseaux ou sous la peau avec ouverture partielle d'un os du crâne⁴³. À côté de ces systèmes qui mesurent directement ou qui modifient l'activité du cerveau, d'autres dispositifs fournissent des informations indirectes sur le comportement du sujet et le fonctionnement de son cerveau. Il s'agit notamment de paramètres physiologiques – activité musculaire, mouvements oculaires, diamètre pupillaire, fréquence cardiaque, conductance cutanée, etc. – dont les modifications sont involontaires et le plus souvent inconscientes. Dans de nombreux cas plusieurs technologies sont associées et combinées. Par exemple des dispositifs de détection et de stimulation peuvent être associés de façon à adapter la stimulation en temps réel, formant des dispositifs en boucle fermée. Des enregistrements d'activité cérébrale et de paramètres physiologiques peuvent être combinés. D'une manière générale, les dispositifs tendent à être miniaturisés pour être aussi discrets que possible et ne pas interférer avec les activités normales de la personne, pour devenir des accessoires portatifs.

Mesure de l'activité cérébrale. Le fonctionnement des neurones repose sur des changements dynamiques du potentiel électrique de leur membrane qui reflètent l'activité des synapses (points de communication entre neurones) et sont responsables des potentiels d'action (« influx nerveux » ou « décharge » se propageant le long des axones). Comme chaque fragment de tissu cérébral contient de très nombreux neurones et bien davantage de synapses⁴⁴, ce qui est habituellement mesuré est le champ de potentiel électrique local généré par un très grand nombre de neurones. Ses variations sont détectées à l'aide de différents types d'électrodes placées à la surface du scalp (électroencéphalogramme – EEG), ou directement au contact du cortex cérébral (électrocorticogramme), ou encore à l'intérieur du cerveau (dans certains cas des électrodes internes peuvent détecter l'activité de neurones individuels). Du fait de la plus faible distance entre la source du signal et l'électrode et de l'absence d'obstacles (os, peau, ...), les enregistrements intracrâniens sont beaucoup plus précis que les enregistrements externes. D'autres paramètres reflétant l'activité cérébrale peuvent être mesurés par imagerie mais sont réservés au diagnostic ou à la recherche⁴⁵.

Modification de l'activité cérébrale. Les technologies utilisées pour modifier l'activité cérébrale des sujets humains font appel à des stimuli électriques ou magnétiques. Des électrodes de stimulation profonde peuvent être placées à l'intérieur du cerveau et modifier l'activité d'une petite région cérébrale (stimulation cérébrale profonde). Les conséquences de cette stimulation sont complexes, variables selon les paramètres utilisés (fréquence, intensité) et la région cible⁴⁶, et font encore l'objet de recherches. Dans le cas de la stimulation profonde pour la maladie de Parkinson, l'effet le plus clair est, contrairement à ce que l'on pourrait penser, non pas une activation de la région stimulée, mais une inhibition fonctionnelle (les effets de la stimulation cérébrale profonde ont été découverts parce

⁴³ Leuthardt EC, Moran DW, Mullen TR. Defining Surgical Terminology and Risk for Brain Computer Interface Technologies. *Front Neurosci.* 2021 15:599549. doi:10.3389/fnins.2021.599549.

⁴⁴ Environ 15 000 neurones et 150 millions de synapses dans 1 mm³ de cortex cérébral (Shapson-Coe A, Januszewski M, Berger DR, Pope A, Wu Y, Blakely T, Schalek RL, Li PH, Wang S, Maitin-Shepard J, Karlupia N, Dorkenwald S, Sjostedt E, Leavitt L, Lee D, Troidl J, Collman F, Bailey L, Fitzmaurice A, Kar R, Field B, Wu H, Wagner-Carena J, Aley D, Lau J, Lin Z, Wei D, Pfister H, Peleg A, Jain V, Lichtman JW. A petavoxel fragment of human cerebral cortex reconstructed at nanoscale resolution. *Science.* 2024, 384:eadk4858. doi:10.1126/science.adk4858).

⁴⁵ Il s'agit par exemple de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), de la magnétoencéphalographie (MEG), de la spectroscopie dans l'infrarouge proche (NIRS, *near-infrared spectroscopy*), ou de la tomographie par émission de positons (TEP). Voir Annexe 1-2.

⁴⁶ Les paramètres de stimulation varient selon la région stimulée et les indications. Par exemple, pour la stimulation cérébrale profonde du noyau sous-thalamique dans la maladie de Parkinson, les valeurs peuvent être : durée, 70-80 µs, fréquence environ 150 Hz, amplitude 2-3 V (Rodriguez-Oroz MC, Obeso JA, Lang AE, Houeto JL, Pollak P, Rehnroona S, Kulisevsky J, Albanese A, Volkmann J, Hariz MI, Quinn NP, Speelman JD, Guridi J, Zamaribe I, Gironell A, Molet J, Pascual-Sedano B, Pidoux B, Bonnet AM, Agid Y, Xie J, Benabid AL, Lozano AM, Saint-Cyr J, Romito L, Contarino MF, Scerati M, Fraix V, Van Blercom N. *Brain.* 2005 128:2240-9. doi:10.1093/brain/awh571z, 2005). Ceci résulte en un courant de quelques mA (96. Pollak P, Burkhard P, Vingerhoets F. Stimulation cérébrale profonde : passé, présent et avenir. *Rev Med Suisse.* 2015, 11:958-61).

qu'ils mimaient de façon réversible ceux de la destruction du tissu). Les stimulations externes (appareils placés à l'extérieur de la tête) utilisent différents types de champs magnétiques ou de courants électriques (voir Annexe 1-2). Leurs conséquences sur l'activité cérébrale sont également complexes et peuvent combiner des phénomènes d'activation, d'inhibition ou de modification des rythmes de l'activité neuronale. Des stimulations invasives ou non d'autres régions du système nerveux y compris de nerfs, comme le nerf vague, sont susceptibles d'influer sur l'activité cérébrale⁴⁷. Une place particulière doit être faite aux stimulations de nerfs (nerf auditif pour les implants cochléaires), d'organes sensoriels (implants rétiniens), ou directement du cerveau dans le but de compenser un déficit sensoriel. Dans ce cas, les stimulations doivent être précises pour transmettre des informations sensorielles aussi complètes que possible. De nombreuses recherches sont en cours afin d'affiner la compréhension de ces phénomènes et la maîtrise des technologies.

Mise en place des dispositifs invasifs. La mise en place d'électrodes à l'intérieur du cerveau nécessite un acte neurochirurgical fondé sur des méthodes de stéréotaxie qui permettent leur positionnement très précis, en coordonnées tridimensionnelles. Le dispositif intracrânien est relié à un boîtier situé sous la peau au niveau du thorax, qui contient une pile et permet des réglages par télécommande. Outre les risques inhérents à tout acte neurochirurgical, la présence au long cours de matériel intracérébral implanté ainsi que celle des connecteurs et du boîtier de commande, est susceptible de générer des complications notamment infectieuses. La réalisation de telles interventions dans des centres spécialisés, disposant d'équipements performants et de personnel entraîné, en diminue les risques immédiats. Il faut mentionner ici les questions soulevées par les techniques récentes de lésions cérébrales focales « non chirurgicales » qui doivent faire l'objet d'une attention particulière⁴⁸.

2.2. Les données recueillies

2.2.1. Les données neurales et leur association avec des données non neurales

L'analyse des signaux cérébraux a beaucoup bénéficié des progrès des techniques d'apprentissage automatique. Les dispositifs invasifs, par exemple les réseaux de microélectrodes corticales, sont notamment utilisés pour déchiffrer les ébauches ou les intentions de mouvements ou de paroles et actionner des neuroprothèses. Les progrès réalisés sont impressionnants puisque les approches actuelles combinant l'apprentissage automatique pour l'analyse des signaux cérébraux et l'intelligence artificielle générative pour faciliter leur interprétation permettent la synthèse vocale ou l'écriture rapide chez des sujets entièrement paralysés ou incapables de parler du fait de déficits moteurs⁴⁹. L'écriture ou la synthèse de la parole faisant appel à des techniques non-invasives (imagerie par résonance magnétique fonctionnelle) sont en cours de développement avec des résultats plus

⁴⁷ Le nerf vague (ou pneumogastrique) est un nerf crânien issu du tronc cérébral qui innerve de nombreux organes y compris le cœur et le tube digestif. Il transmet normalement des informations dans les deux sens, du cerveau vers ces organes et de ces organes vers le cerveau. Les effets de la stimulation transcutanée externe ou invasive du nerf vague sont étudiés dans des affections très diverses allant des troubles du rythme cardiaque à l'épilepsie ou à la dépression (Jung B, Yang C, Lee SH. Vagus nerves stimulation: clinical implication and practical issue as a neuropsychiatric treatment. *Clin Psychopharmacol Neurosci*. 2024 22:13-22. doi:10.9758/cpn.23.1101).

⁴⁸ Ces interventions sont clairement invasives puisqu'elles provoquent des destructions localisées de tissu cérébral sans qu'il soit nécessaire d'ouvrir la boîte crânienne, ni même la peau. Ce type d'approche offre, en principe, des possibilités thérapeutiques nouvelles, mais appelle une vigilance particulière concernant les indications du fait de la grande variété des effets qui peuvent être obtenus et de leur nature irréversible, conjuguée à la facilité apparente de mise en œuvre. Par exemple, les ultrasons focalisés guidés par imagerie par résonance magnétique (MRgFUS) sont utilisés pour traiter le tremblement essentiel et pourraient être une alternative à la stimulation cérébrale profonde (Shiramba A, Lane S, Ray N, Gilbertson T, Srinivasaiah R, Panicker J, Radon M, Osman-Farah J, Macerollo A. Efficacy and Safety of Magnetic Resonance-Guided Focused Ultrasound Thalamotomy in Essential Tremor: A Systematic Review and Metanalysis. *Mov Disord*. 2025 40:1020-33. doi:10.1002/mds.30188 ; Rodriguez-Oroz MC, Martínez-Fernández R, Lipsman N, Horisawa S, Moro E. Bilateral Lesions in Parkinson's Disease: Gaps and Controversies. *Mov Disord*. 2025 40:231-40. doi:10.1002/mds.30090).

⁴⁹ Silva AB, Littlejohn KT, Liu JR, Moses DA, Chang EF. The speech neuroprosthesis. *Nat Rev Neurosci*. 2024 25:473-92. doi:10.1038/s41583-024-00819-9 ; Li S, Wang H, Chen X, Wu D. Multimodal Brain-Computer Interfaces: AI-powered Decoding Methodologies. [ArXiv](#). 2025 (preprint) ; Khan S, Kallis L, Mee H, El Hadwe S, Barone D, Hutchinson P, Koliás A. Invasive Brain-Computer Interface for Communication: A Scoping Review. *Brain Sci*. 2025, 15:336. doi:10.3390/brainsci15040336.

limitées⁵⁰, mais les preuves de concept existent. Des méthodes d'enregistrement non-invasives, utilisant des données d'électroencéphalographie, de magnétoencéphalographie, ou d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, analysées par les techniques d'intelligence artificielle générative, permettent de recréer avec une grande précision les images perçues par les personnes⁵¹ ou de créer de brefs commentaires les décrivant⁵². En revanche, les enregistrements d'électroencéphalogramme avec des systèmes simples (type casque, accessoires intra-auriculaires, lunettes...) ne permettent que des réponses beaucoup plus limitées⁵³. En plus des données cérébrales à proprement parler, il faut insister sur le fait que leur combinaison avec l'enregistrement de certains paramètres physiologiques et certaines activités du sujet (mouvements du corps, géolocalisation, pages web consultées...) peut révéler des informations privées, intimes, à l'insu de la personne. Enfin certains dispositifs en cours de développement ont pour objectif de détecter l'activité électrique musculaire (électromyogramme) au niveau du poignet, à l'aide d'un bracelet, pour déduire ce que la personne cherche à écrire, avec l'objectif de remplacer l'usage du clavier d'ordinateur⁵⁴. Dans ce cas les auteurs ne parlent pas d'interface « cerveau-ordinateur » mais d'interface « humain-ordinateur ».

Quelles que soient les approches utilisées, les technologies d'interfaces cerveau-machine et de neurostimulation se heurtent à des difficultés et des limites inhérentes à leur objet. En effet, chaque région cérébrale est spécialisée mais en interaction avec de nombreuses autres régions. De plus, les informations recueillies reflètent des variations globales et relativement grossières d'activité, pour lesquelles la qualité des signaux diminue fortement avec les recueils extracrâniens. Il est donc actuellement possible de déduire des informations parfois très précises de l'enregistrement de régions limitées du cerveau, mais pas de « lire les pensées » de manière générale⁵⁵ (malgré certains abus de langage que l'on peut relever dans la communication). La transmission d'informations vers le tissu neuronal (par exemple pour remplacer une entrée sensorielle déficiente) se heurte quant à elle au manque de précision des méthodes disponibles. Les méthodes utilisées en expérimentation animale (voir Annexe 1-4) pour améliorer cette précision (par exemple l'optogénétique⁵⁶) posent encore de nombreuses difficultés pour être transposées chez l'humain.

⁵⁰ Tang J, LeBel A, Jain S, Huth AG. Semantic reconstruction of continuous language from non-invasive brain recordings. *Nat Neurosci*. 2023 26:858-66. doi:10.1038/s41593-023-01304-9. Pour l'écriture à partir d'électroencéphalographie ou de magnétoencéphalographie : Lévy J, Zhang M, Pinet S, Rapin J, Banville H, d'Ascoli S, King JR. Brain-to-Text Decoding: A Non-invasive Approach via Typing. [ArXiv](#). 2025 (preprint).

⁵¹ Par exemple les travaux de l'équipe de Jean-Rémi King: Careil M, Benchetrit Y, King JR. Dynadiff: Single-stage Decoding of Images from Continuously Evolving fMRI. [ArXiv](#). 2025 (preprint), Banville H, Benchetrit Y, d'Ascoli S, Rapin J, King JR. Scaling laws for decoding images from brain activity. [ArXiv](#). 2025 (preprint).

⁵² Horikawa T. Mind captioning: Evolving descriptive text of mental content from human brain activity. *Sci Adv*. 2025 11:eadw1464. doi:10.1126/sciadv.adw1464.

⁵³ Par exemple le déplacement d'un curseur - Lazarou I, Nikolopoulos S, Petrantonakis PC, Kompatsiaris I, Tsolaki M. EEG-Based Brain-Computer Interfaces for Communication and Rehabilitation of People with Motor Impairment: A Novel Approach of the 21st Century. *Front Hum Neurosci*. 2018 12:14. doi:10.3389/fnhum.2018.00014 ; Yadav H, Maini S. Decoding brain signals: A comprehensive review of EEG-Based BCI paradigms, signal processing and applications. *Comput Biol Med*. 2025, 196:110937. doi:10.1016/j.combiomed.2025.110937.. Des réponses comme le pilotage d'engins automobiles, engendrées par l'analyse de données EEG recueillies par des dispositifs légers, ont fait l'objet de communications médiatiques, sans publication scientifique.

⁵⁴ Kaifosh P, Reardon TR; CTRL-labs at Reality Labs. A generic non-invasive neuromotor interface for human-computer interaction. *Nature*. 2025 645:702-11. doi:10.1038/s41586-025-09255-w.

⁵⁵ L'utilisation d'interfaces cerveau-machine pour la production de langage par ordinateur chez les sujets paralysés demande qu'ils prononcent intérieurement les mots. Toutefois, des travaux récents montrent qu'il est possible de détecter dans le cortex moteur des signaux correspondant au « discours intérieur », sans ébauche de prononciation. Ce discours intérieur se rapproche de ce qu'on entend par le terme vague de « pensées » et dont le caractère privé est manifeste. Pour le respecter, les auteurs proposent d'utiliser un système de mot de passe interne (mot improbable et dénué de sens comme « chittychittybangbang ») que le sujet utiliserait pour déclencher le décodage quand il le souhaite... Kunz EM, Abramovich Krasa B, Kamdar F, Avansino DT, Hahn N, Yoon S, Singh A, Nason-Tomaszewski SR, Card NS, Jude JJ, Jacques BG, Bechefskey PH, Jacobacci C, Hochberg LR, Rubin DB, Williams ZM, Brandman DM, Stavisky SD, AuYong N, Pandarinath C, Druckmann S, Henderson JM, Willett FR. Inner speech in motor cortex and implications for speech neuroprostheses. *Cell*. 2025 188:4658-73. doi:10.1016/j.cell.2025.06.015.

⁵⁶ L'optogénétique consiste à utiliser des méthodes de génétique moléculaire pour faire exprimer, uniquement dans certains neurones, une protéine permettant de les activer ou de les inhiber sélectivement par la lumière fournie par une fibre optique. La sonogénétique, de développement plus récent et plus limité, utilise des protéines rendant les neurones activables par les ultrasons. Lüscher C, Emiliani V, Farahany N, Gittis A, Gradinaru V, High KA, Roska B, Sahel JA, Yizhar O, Zeng H, Deisseroth K. Roadmap for direct and indirect

2.2.2. Caractère identifiant des données neurales

Il est possible d'identifier les sujets en reconstruisant leur visage à partir des images obtenues par imagerie par résonance magnétique (IRM) cérébrale puis en utilisant des techniques de reconnaissance faciale et des bases de données publiques⁵⁷. Les données sur la morphologie cérébrale permettent également l'identification individuelle, la forme du cerveau et des sillons corticaux étant caractéristique de chaque individu⁵⁸. C'est aussi, dans une certaine mesure, le cas de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle cérébrale à l'état de repos⁵⁹ et de la magnétoencéphalographie⁶⁰. Les données fonctionnelles recueillies par électroencéphalographie sont également potentiellement identifiantes et leur utilisation comme marqueurs biométriques dans le but de contrôler l'identité (authentification) a été proposée⁶¹. À l'heure actuelle, le caractère identifiant des données neurales recueillies avec des interfaces cerveau-machine non-invasives légères n'est pas démontré, mais doit être considéré comme potentiel en fonction du développement des méthodes d'analyse.

2.3. Les principaux usages actuels ou envisagés

Les neurotechnologies numériques sont déjà utilisées dans certains domaines particuliers, essentiellement médicaux. Mais de nombreux acteurs du domaine envisagent des applications plus larges, dont certaines semblent plus réalistes que d'autres. Pour tenter de cerner l'éventail des possibilités, cette section résume les usages actuels ou envisagés, sans discuter de leur bien-fondé. Alors que les applications médicales des neurotechnologies sont déjà développées dans un cadre bien défini et concernent aussi bien les dispositifs invasifs que non-invasifs, les applications non-médicales ne peuvent concerner, en tout cas en France, que des méthodes non-invasives. L'implantation intracrânienne d'un dispositif d'interface ou de stimulation ne peut être réalisée que par un médecin avec un objectif thérapeutique clairement identifié, en accord avec la déontologie, à l'issue d'un processus d'évaluation scientifique et éthique et l'obtention des autorisations nécessaires. De plus, tous les matériels utilisés doivent avoir les labellisations européennes et françaises exigées réglementairement. En revanche les dispositifs non-invasifs utilisés dans un but non médical ne sont le plus souvent pas soumis à ce type de contrôles.

2.3.1. Usages médicaux

Le développement des interfaces cerveau-machine et d'autres neurotechnologies numériques trouve son origine et sa justification principale dans les applications médicales. On peut de façon

translation of optogenetics into discoveries and therapies for humans. *Nat Neurosci.* 2025 28:2415-31. doi:10.1038/s41593-025-02097-9. Voir Annexe 1-4.

⁵⁷ Steeg K, Bohrer E, Schäfer SB, Vu VD, Scherberich J, Windfelder AG, Krombach GA. Re-identification of anonymised MRI head images with publicly available software: investigation of the current risk to patient privacy. *The Lancet, eClinical Medicine.* 2024 78:102930. doi:10.1016/j.eclinm.2024.102930.

⁵⁸ Identification of individual subjects based on neuroanatomical measures obtained 7 years earlier. Jäncke L, Valizadeh SA. *Eur J Neurosci.* 2022, 56:4642-52. doi:10.1111/ejn.15770.

⁵⁹ L'identification individuelle est possible chez l'adulte (Serhan Y, Darawshy S, Wei W, Margulies DS, Nenning KH, Ovadia-Caro S. Individual uniqueness of connectivity gradients is driven by the complexity of the embedded networks and their dispersion. *Brain Struct Funct.* 2025 230:110. doi:10.1007/s00429-025-02976-8 ; Venkatesh M, Jaja J, Pessoa L. Comparing functional connectivity matrices: A geometry-aware approach applied to participant identification. *Neuroimage.* 2020 207:116398. doi:10.1016/j.neuroimage.2019.116398 ; Misra J, Surampudi SG, Venkatesh M, Limbachia C, Jaja J, Pessoa L. Learning brain dynamics for decoding and predicting individual differences. *PLoS Comput Biol.* 2021, 17:e1008943. doi:10.1371/journal.pcbi.1008943) et aussi chez le très jeune enfant (Kim JH, De Asis-Cruz J, Limperopoulos C. Separating group- and individual-level brain signatures in the newborn functional connectome: A deep learning approach. *Neuroimage.* 2024, 299:120806. doi:10.1016/j.neuroimage.2024.120806 ; Kardan O, Kaplan S, Wheelock MD, Feczko E, Day TKM, Miranda-Dominguez O, Meyer D, Eggebrecht AT, Moore LA, Sung S, Chamberlain TA, Earl E, Snider K, Graham A, Berman MG, Uğurbil K, Yacoub E, Elison JT, Smyser CD, Fair DA, Rosenberg MD. Resting-state functional connectivity identifies individuals and predicts age in 8-to-26-month-olds. *Dev Cogn Neurosci.* 2022, 56:101123. doi:10.1016/j.dcn.2022.101123).

⁶⁰ Wu S, Ramdas A, Wehbe L. Brainprints: identifying individuals from magnetoencephalograms. *Commun Biol.* 2022 5:852. doi:10.1038/s42003-022-03727-9.

⁶¹ Yang YY, Hwang AH, Wu CT, Huang TR. Person-identifying brainprints are stably embedded in EEG mindprints. *Sci Rep.* 2022, 12:17031. doi:10.1038/s41598-022-21384-0.

schématique distinguer les neuroprothèses, sensorielles ou motrices et les dispositifs de modulation de l'activité cérébrale.

Les neuroprothèses

Remplacement d'une fonction sensorielle déficiente. Les succès ont surtout été obtenus par stimulation directe d'un nerf sensoriel dans le cadre des implants cochléaires⁶², utilisés depuis plusieurs décennies pour les surdités profondes sans atteinte du nerf auditif. Des recherches très actives sont en cours pour pallier le déficit visuel dans les maladies de la rétine par des dispositifs prothétiques⁶³ ou par optogénétique⁶⁴, mais les résultats sont encore limités car les difficultés sont plus importantes que pour l'audition. Dans le cas de la cochlée ou de la rétine, il s'agit d'interventions sur les terminaisons nerveuses ou l'organe sensoriel, mais pas directement sur le cerveau. Les stimulations des centres auditifs du tronc cérébral peuvent permettre une perception sonore fruste lorsque le nerf auditif est détruit⁶⁵, mais les tentatives de stimulation directe de régions sensorielles du cerveau sont pour l'instant très préliminaires car elles soulèvent de nombreuses difficultés théoriques et pratiques. Des recherches sont en cours pour l'audition et la vision, ainsi que pour la sensibilité cutanée⁶⁶.

Remplacement d'une commande motrice déficiente. Il s'agit essentiellement de pallier une paralysie, en associant le décodage de l'activité d'une région de commande dans le cortex cérébral et la mise en œuvre d'une réponse par un robot (manipulation d'objets, exosquelette...) ou par un dispositif d'écriture ou de synthèse vocale (dans le cas, par exemple, de tétraplégies hautes, de syndrome d'enfermement ou « *locked-in syndrome* », ou de sclérose latérale amyotrophique). La réponse peut être une activation d'une prothèse de membre supérieur⁶⁷ ou une aide à la marche⁶⁸ de sujets paralysés. Les travaux récents illustrent les possibilités de reconstitution en temps réel de la voix⁶⁹, y compris à partir du « discours intérieur »⁷⁰ (c'est-à-dire sans ébauche de prononciation volontaire) chez des sujets ayant perdu la commande motrice. Dans certains cas, la stimulation du système nerveux lui-même (moelle épinière ou nerf périphérique) ou de muscles en aval de la lésion est réalisée

⁶² Haute Autorité de Santé - [Le traitement de la surdité par implants cochléaires ou du tronc cérébral](#), 2012. Plusieurs centaines de milliers de personnes sont porteuses d'implants cochléaires dans le monde et plus de mille sont posés chaque année en France.

⁶³ Il s'agit d'implants rétinien de petite taille, notamment des implants photovoltaïques activés directement par des rayons infrarouges sans nécessité de transmission filaire (Holz FG, Le Mer Y, Muqit MMK, Hattenbach LO, Cusumano A, Grisanti S, Kodjikian L, Pileri MA, Matonti F, Souied E, Stanzel BV, Szurman P, Weber M, Bartz-Schmidt KU, Eter N, Delyfer MN, Girmens JF, van Overdam KA, Wolf A, Hornig R, Corazzol M, Brodie F, Olmos de Koo L, Palanker D, Sahel JA. Subretinal Photovoltaic Implant to Restore Vision in Geographic Atrophy Due to AMD. *N Engl J Med*. 2026 394:232-42. doi:10.1056/NEJMoa2501396).

⁶⁴ Sahel JA, Boulanger-Scemama E, Pagot C, Arleo A, Gallupi F, Martel JN, Esposti SD, Delaux A, de Saint Aubert JB, de Montleau C, Gutman E, Audo I, Duebel J, Picaud S, Dalkara D, Blouin L, Tael M, Roska B. Partial recovery of visual function in a blind patient after optogenetic therapy. *Nat Med*. 2021 27:1223-9. doi:10.1038/s41591-021-01351-4.

⁶⁵ Garcia A, Haleem A, Poe S, Gosh D, Christian Brown M, Herrmann BS, Lee DJ. Auditory Brainstem Implant Outcomes in Tumor and Nontumor Patients: A Systematic Review. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2024 170:1648-58. doi:10.1002/ohn.662.

⁶⁶ Valle G, Alamri AH, Downey JE, Lienkämper R, Jordan PM, Sobinov AR, Endsley LJ, Prasad D, Boninger ML, Collinger JL, Warnke PC, Hatsopoulos NG, Miller LE, Gaunt RA, Greenspon CM, Bensmaia SJ. Tactile edges and motion via patterned microstimulation of the human somatosensory cortex. *Science*. 2025 387:315-22. doi:10.1126/science.adq5978.

⁶⁷ Nason SR, Mender MJ, Letner JG, Chestek CA, Patil PG. Restoring upper extremity function with brain-machine interfaces. *Int Rev Neurobiol*. 2021 159:153-86. doi:10.1016/bs.irn.2021.06.001.

⁶⁸ Wagner FB, Mignardot JB, Le Goff-Mignardot CG, Demesmaeker R, Komi S, Capogrosso M, Rowald A, Seáñez I, Caban M, Pirondini E, Vat M, McCracken LA, Heimgartner R, Fodor I, Watrin A, Seguin P, Paoles E, Van Den Keybus K, Eberle G, Schurch B, Pralong E, Becce F, Prior J, Buse N, Buschman R, Neufeld E, Kuster N, Carda S, von Zitzewitz J, Delattre V, Denison T, Lambert H, Minassian K, Bloch J, Courtine G. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *Nature*. 2018 563:65-71. doi:10.1038/s41586-018-0649-2.

⁶⁹ Wairagkar M, Card NS, Singer-Clark T, Hou X, Iacobacci C, Miller LM, Hochberg LR, Brandman DM, Stavisky SD. An instantaneous voice-synthesis neuroprosthesis. *Nature*. 2025 Jun 12. doi:10.1038/s41586-025-09127-3.

⁷⁰ Kunz EM, Abramovich Krasa B, Kamdar F, Avansino DT, Hahn N, Yoon S, Singh A, Nason-Tomaszewski SR, Card NS, Jude JJ, Jacques BG, Bechefsky PH, Iacobacci C, Hochberg LR, Rubin DB, Williams ZM, Brandman DM, Stavisky SD, AuYong N, Pandarinath C, Druckmann S, Henderson JM, Willett FR. Inner speech in motor cortex and implications for speech neuroprostheses. *Cell*. 2025 188:4658-73. doi:10.1016/j.cell.2025.06.015.

en complément de la réponse d'une prothèse, pour faciliter un mouvement et prévenir l'atrophie musculaire⁷¹.

La modulation du fonctionnement de centres nerveux

Modulation à l'aide de dispositifs invasifs. Il s'agit dans ce cas de modifier l'activité de régions du cerveau impliquées directement ou indirectement dans le mécanisme de certaines affections neurologiques ou psychiatriques. Les régions ciblées sont identifiées à l'aide de modèles animaux, lorsqu'ils existent, et des perturbations fonctionnelles observées en imagerie cérébrale chez les patients. Toutefois, l'identification de ces régions cibles reste généralement empirique, par essais et erreurs. Les mécanismes d'action de la stimulation cérébrale sont eux-mêmes mal compris, vraisemblablement multiples, différents selon les pathologies et les régions stimulées. L'idée générale est que la maladie est responsable d'un dysfonctionnement de plusieurs régions cérébrales et de leurs connexions. La stimulation cérébrale, en ciblant l'une de ces régions, vise à rétablir l'équilibre de l'ensemble et à diminuer ou faire disparaître certaines manifestations. Il s'agit donc de traitements symptomatiques et non d'un traitement spécifique de la cause de la maladie.

Les succès les plus probants ont été obtenus par la stimulation cérébrale profonde dans le traitement des troubles des mouvements (maladie de Parkinson⁷² surtout, mais aussi tremblement essentiel⁷³ et dystonies⁷⁴). L'utilisation de la stimulation cérébrale dans les épilepsies pharmaco-résistantes est en cours de développement, avec un intérêt particulier pour les systèmes en boucle fermée qui auraient l'avantage de ne déclencher la stimulation que lorsque des signes avant-coureurs de crise sont détectés afin d'en prévenir la survenue⁷⁵. Des résultats encourageants ont aussi été obtenus dans les douleurs chroniques sévères⁷⁶. Les applications de la stimulation cérébrale profonde en psychiatrie ont été freinées par la compréhension limitée des circuits anatomiques dysfonctionnels dans ces affections. Des résultats favorables ont toutefois été obtenus et confirmés dans les troubles obsessionnels compulsifs sévères⁷⁷. Dans le cadre de la dépression résistante au traitement, les premiers résultats positifs n'ont pas été confirmés. Les experts auditionnés pensent que cela reflète l'hétérogénéité du trouble dépressif et qu'une adaptation de la région ciblée selon les patients et l'utilisation de techniques en boucle fermée permettant de régler la stimulation selon l'activité des circuits concernés pourraient permettre de surmonter les obstacles⁷⁸. La stimulation cérébrale

⁷¹ La trophicité désigne les processus qui participent à la nutrition et à la croissance des organes. En cas de paralysie, les muscles squelettiques s'atrophient (diminuent de taille et perdent leur efficacité).

⁷² Deuschl G, Antonini A, Costa J, Śmiłowska K, Berg D, Corvol JC, Fabbrini G, Ferreira J, Foltynie T, Mir P, Schrag A, Seppi K, Taba P, Ruzicka E, Selikhova M, Henschke N, Villanueva G, Moro E. European Academy of Neurology/Movement Disorder Society-European Section Guideline on the Treatment of Parkinson's Disease: I. Invasive Therapies. *Mov Disord.* 2022 37:1360-74. doi:10.1002/mds.29066.

⁷³ Erro R, Fasano A, Barone P, Bhatia KP. Milestones in Tremor Research: 10 Years Later. *Mov Disord Clin Pract.* 2022 9:429-35. doi:10.1002/mdc3.13418.

⁷⁴ Krack P, Volkmann J, Tinkhauser G, Deuschl G. Deep Brain Stimulation in Movement Disorders: From Experimental Surgery to Evidence-Based Therapy. *Mov Disord.* 2019 34:1795-810. doi:10.1002/mds.27860.

⁷⁵ Shon YM, Park HR, Lee S. Deep Brain Stimulation Therapy for Drug-Resistant Epilepsy: Present and Future Perspectives. *J Epilepsy Res.* 2025 15:33-41. doi:10.14581/jer.25004.

⁷⁶ Knotkova H, Hamani C, Sivanesan E, Le Beuffe MFE, Moon JY, Cohen SP, Huntoon MA. Neuromodulation for chronic pain. *Lancet.* 2021 397:2111-24. doi:10.1016/S0140-6736(21)00794-7.

⁷⁷ Mallet L, Polosan M, Jaafari N, Baup N, Welter ML, Fontaine D, du Montcel ST, Yelnik J, Chéreau I, Arbus C, Raoul S, Aouizerate B, Damier P, Chabardès S, Czernecki V, Ardouin C, Krebs MO, Bardinet E, Chaynes P, Burbaud P, Cornu P, Derost P, Bougerol T, Bataille B, Mattei V, Dormont D, Devaux B, Vérin M, Houeto JL, Pollak P, Benabid AL, Agid Y, Krack P, Millet B, Pelissolo A; STOC Study Group. Subthalamic nucleus stimulation in severe obsessive-compulsive disorder. *N Engl J Med.* 2008 359:2121-34. doi:10.1056/NEJMoa0708514 ; Mar-Barrutia L, Real E, Segalás C, Bertolín S, Menchón JM, Alonso P. Deep brain stimulation for obsessive-compulsive disorder: A systematic review of worldwide experience after 20 years. *World J Psychiatry.* 2021 11:659-80. doi:10.5498/wjp.v11.i9.659 ; Visser-Vandewalle V, Andrade P, Mosley PE, Greenberg BD, Schuurman R, McLaughlin NC, Voon V, Krack P, Foote KD, Mayberg HS, Figeé M, Kopell BH, Polosan M, Joyce EM, Chabardès S, Matthews K, Baldermann JC, Tyagi H, Holtzheimer PE, Bervoets C, Hamani C, Karachi C, Denys D, Zrinzo L, Blomstedt P, Naesström M, Aboosh A, Rasmussen S, Coenen VA, Schlaepfer TE, Dougherty DD, Domenech P, Silburn P, Giordano J, Lozano AM, Sheth SA, Coyne T, Kuhn J, Mallet L, Nuttin B, Hariz M, Okun MS. Deep brain stimulation for obsessive-compulsive disorder: a crisis of access. *Nat Med.* 2022 28:1529-32. doi:10.1038/s41591-022-01879-z.

⁷⁸ Scangos KW, Khambhati AN, Daly PM, Makhoul GS, Sugrue LP, Zamanian H, Liu TX, Rao VR, Sellers KK, Dawes HE, Starr PA, Krystal AD, Chang EF. Closed-loop neuromodulation in an individual with treatment-resistant depression. *Nat Med.* 2021 27:1696-700. doi:10.1038/s41591-021-01480-w.

profonde reste donc du domaine de la recherche dans la dépression résistante comme dans d'autres affections psychiatriques graves⁷⁹. Il faut souligner que du fait des complications possibles liées au geste neurochirurgical et au matériel implanté, ce type de recherche thérapeutique ne peut s'envisager que dans le contexte de services spécialisés et d'essais thérapeutiques dûment autorisés.

Modulation à l'aide de dispositifs non-invasifs. Ces méthodes suscitent un grand intérêt puisqu'elles pourraient avoir des indications plus larges que la stimulation profonde avec des risques bien plus limités. Contrairement aux stimulations profondes qui peuvent être continues, les stimulations non-invasives sont effectuées lors de séances spécifiques plus ou moins répétées, dans un environnement médical. Des effets significatifs de différentes méthodes non-invasives ont été rapportés, y compris dans des essais cliniques contrôlés, mais avec une efficacité généralement modérée. C'est le cas, par exemple, dans les douleurs neuropathiques⁸⁰ (douleurs chroniques d'origine neurologique) ou pour certains symptômes psychiatriques⁸¹. Certains effets bénéfiques, lorsqu'ils sont observés, paraissent être rémanents, c'est-à-dire persister entre ou après les sessions thérapeutiques. Actuellement, c'est la stimulation magnétique transcrânienne (*transcranial magnetic stimulation*, TMS) qui semble donner les effets les plus intéressants et être utile chez certains patients, souvent en combinaison avec d'autres approches thérapeutiques. Comme pour tout traitement médical, la confirmation des résultats nécessite leur reproduction dans plusieurs études contrôlées rigoureuses, avec suffisamment de sujets, donnant des résultats convergents, ce qui est souvent encore loin d'être le cas.

Des stimulations non-invasives susceptibles de restaurer des fonctions cognitives, exécutives, ou la mémoire après lésion cérébrale, comme dans les accidents vasculaires cérébraux⁸² ou dans le cadre de maladies neuro-évolutives, font l'objet de recherches et de publications avec des résultats encore incertains. Si de tels dispositifs étaient mis au point et leur efficacité démontrée, leur intérêt pour compenser des déficits chez des patients serait indéniable. En revanche, leur usage chez des sujets non malades soulèverait nécessairement de nombreuses questions en soulignant d'emblée que la capacité d'améliorer un déficit ne permet pas *a priori* d'extrapoler une possibilité d'« augmentation » du fonctionnement normal.

2.3.2. Usages non médicaux

Les usages non médicaux sont envisagés ou proposés dans des cadres extrêmement divers, professionnels, éducatifs, sportifs, ou d'activités de loisir. Il faut rappeler qu'en France, l'utilisation d'interfaces cerveau-machine implantées (invasives) dans de tels contextes n'est pas envisageable et que la prospective ne concerne que les dispositifs portables non-invasifs. Les stimulations cérébrales non-invasives font déjà l'objet d'utilisations en dehors du cadre médical. Les stimulations magnétiques nécessitant des appareils de taille importante peuvent être accessibles au public dans certains pays alors que des stimulateurs magnétiques de plus petite taille ou surtout des stimulateurs utilisant des courants électriques peuvent être achetés sur internet, voire construits par les utilisateurs eux-

⁷⁹ La stimulation cérébrale profonde a été étudiée, de manière souvent préliminaire, dans diverses autres affections comme le syndrome de Gilles de la Tourette, les schizophrénies résistantes, l'anorexie mentale, les addictions (troubles de l'usage de substances), les désordres de stress post-traumatiques (Clair AH, Haynes W, Mallet L. Recent advances in deep brain stimulation in psychiatric disorders. *F1000Res*. 2018 7:F1000 Faculty Rev-699. doi:10.12688/f1000research.14187.1 ; Mahoney JJ 3rd, Koch-Gallup N, Scarisbrick DM, Berry JH, Rezai AR. Deep brain stimulation for psychiatric disorders and behavioral/cognitive-related indications: Review of the literature and implications for treatment. *J Neurol Sci*. 2022 437:120253. doi:10.1016/j.jns.2022.120253).

⁸⁰ Attal N, Poindessous-Jazat F, De Chauvigny E, Quesada C, Mhalla A, Ayache SS, Fermanian C, Nizard J, Peyron R, Lefaucheur JP, Bouhassira D. Repetitive transcranial magnetic stimulation for neuropathic pain: a randomized multicentre sham-controlled trial. *Brain*. 2021 144:3328-39. doi:10.1093/brain/awab208.

⁸¹ Kan RLD, Padberg F, Giron CG, Lin TTZ, Zhang BBB, Brunoni AR, Kranz GS. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex on symptom domains in neuropsychiatric disorders: a systematic review and cross-diagnostic meta-analysis. *Lancet Psychiatry*. 2023 10:252-9. doi:10.1016/S2215-0366(23)00026-3.

⁸² Savelon ECJ, Jordan HT, Stinear CM, Byblow WD. Noninvasive brain stimulation to improve motor outcomes after stroke. *Curr Opin Neurol*. 2024 37:621-8. doi:10.1097/WCO.0000000000001313.

mêmes⁸³. Ces techniques sont utilisées dans des perspectives d'augmentation de capacités physiques ou intellectuelles, alors que leurs effets ne sont pas démontrés et que les risques d'utilisations non encadrées ne sont pas connus.

Des **applications professionnelles** de neurotechnologies numériques sont proposées et leur mise en œuvre semble avoir débuté dans certains pays. L'intérêt pour de telles approches concerne en particulier les professions dans lesquelles le niveau de vigilance et d'attention est important et où les conséquences d'erreurs peuvent être graves (pilotes d'avion, conducteurs de véhicules ou d'engins, utilisateurs de machines dangereuses, chirurgiens, etc.). Les interfaces cerveau-machine proposées peuvent avoir comme objectif de détecter des états cognitifs globaux indésirés (surcharge cognitive, altération de l'attention, endormissement...) ⁸⁴ et d'y remédier soit en générant des signaux d'alarme appropriés, soit en modifiant ou en interrompant la tâche en cours. D'autres dispositifs, possiblement associés aux précédents, pourraient aussi avoir pour but de moduler directement l'état cérébral, par exemple pour maintenir les niveaux de vigilance souhaités⁸⁵. En outre, l'utilisation d'interfaces cerveau-machine pour déclencher des réactions rapides en situation de surcharge cognitive peut avoir un intérêt dans le cas d'opérateurs susceptibles d'être soumis à des conditions extrêmes de contrainte et de danger et est évoquée dans le domaine militaire (par exemple, l'activation d'un système d'armement par un pilote d'avion de chasse)⁸⁶. Il existe cependant des limites « pratiques » liées à la durée des apprentissages nécessaires, aux difficultés de mise en œuvre dans des conditions réalistes, et aux coûts. Ce type de contexte pose par ailleurs des questions relatives à l'interférence possible des interfaces cerveau-machine avec la prise de décision et la responsabilité de la personne concernée.

Selon les mêmes principes, l'utilisation d'interfaces cerveau-machine peut être envisagée dans le cadre d'**activités sportives**, en particulier en phase d'entraînement, comme c'est le cas pour des paramètres cardiovasculaires ou métaboliques⁸⁷. Quant aux usages envisagés dans **l'éducation et la formation**, ils sont abordés spécifiquement dans la section 3.7.

Plus largement, l'inclusion de neurotechnologies dans divers dispositifs est déjà en cours et suscite un intérêt commercial de la part des développeurs et des industriels. Il s'agit de dispositifs non-invasifs « légers » (casques, bandeaux, lunettes, oreillettes...) conçus pour la vie quotidienne ou les loisirs, dans des buts pratiques, ludiques ou récréatifs. De tels dispositifs sont envisagés ou annoncés, par exemple, pour **faciliter l'utilisation d'ordinateurs**, en cherchant à remplacer l'usage manuel du clavier ou de la souris par la détection de signaux cérébraux qui seraient directement transmis à la machine. Leur utilisation dans le cadre de **jeux vidéo**, suscite un intérêt important depuis plusieurs années⁸⁸, du fait du marché potentiel⁸⁹. Au-delà de la possibilité de déplacer un curseur sur un écran, un degré supplémentaire pourrait être l'utilisation de données cérébrales et physiologiques combinées pour animer des personnages numériques (avatars) avec des mouvements suscités et contrôlés par le

⁸³ Les dispositifs, les utilisations et les risques des stimulations cérébrales non-invasives sont décrits dans un [rapport](#) du comité européen *Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks* (SCHEER).

⁸⁴ Par exemple via des casques EEG de type [Emotiv](#) ou de lunettes de type [AttentivU](#).

⁸⁵ Choe J, Coffman BA, Bergstedt DT, Ziegler MD, Phillips ME. Transcranial Direct Current Stimulation Modulates Neuronal Activity and Learning in Pilot Training. *Front Hum Neurosci*. 2016 0:34. doi:10.3389/fnhum.2016.00034 ; Zhu R, Ma X, Wang Z, Hui Q, You X. Improving auditory alarm sensitivity during simulated aeronautical decision-making: the effect of transcranial direct current stimulation combined with computerized working memory training. *Cogn Res Princ Implic*. 2025 10:11. doi:10.1186/s41235-025-00620-x.

⁸⁶ L'utilisation d'interfaces cerveau-machine (tACS) a même été proposée pour renforcer la cohésion de pilotes d'escadrille. Lu H, Zhang Y, Huang P, Zhang Y, Cheng S, Zhu X. Transcranial electrical stimulation offers the possibility of improving teamwork among military pilots: a review. *Front Neurosci*. 2022 16:931265. doi:10.3389/fnins.2022.931265.

⁸⁷ Pei X, Xu G, Zhou Y, Tao L, Cui X, Wang Z, Xu B, Wang AL, Zhao X, Dong H, An Y, Cao Y, Li R, Hu H, Yu Y. A simultaneous electroencephalography and eye-tracking dataset in elite athletes during alertness and concentration tasks. *Sci Data*. 2022 9:465. doi:10.1038/s41597-022-01575-0 ; de Brito MA, Fernandes JR, Esteves NS, Müller VT, Alexandria DB, Pérez DIV, Slimani M, Brito CJ, Bragazzi NL, Miarka B. The Effect of Neurofeedback on the Reaction Time and Cognitive Performance of Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Hum Neurosci*. 2022 16:868450. doi:10.3389/fnhum.2022.868450.

⁸⁸ Par exemple : [Brain Invaders : une interface cerveau-machine multisujet](#), CNRS, 2017.

⁸⁹ Natixis - [Quel est l'état du marché du jeu vidéo en France et quelles sont ses perspectives d'avenir ?](#), 2024.

joueur, en réalité virtuelle ou dans un métavers⁹⁰. Un des objectifs serait d'adapter le jeu aux réactions émotionnelles du joueur, évaluées sur les données neurales et physiologiques recueillies. Des approches technologiques similaires peuvent d'ailleurs être aussi utilisées, en dehors du jeu, pour évaluer certaines réactions lors de **simulations en réalité virtuelle** utilisées **pour des formations, des apprentissages ou des entraînements**, y compris professionnels (par exemple des opérateurs ou des pilotes) ou pour des thérapies comportementales.

Certaines applications ont pour but de procurer des **effets de « bien-être »**. En combinant des casques d'électroencéphalographie (EEG) de faible coût, des capteurs physiologiques variés, et des applications sur téléphone portable, un nombre croissant d'entreprises proposent des systèmes de *neurofeedback*, de « *brain training* » ou d'« optimisation attentionnelle » censés améliorer la concentration ou le sommeil, favoriser la relaxation, ou stimuler la créativité. Ces dispositifs sont souvent présentés comme des outils accessibles, personnalisés, et scientifiquement fondés, alors que leurs fondements empiriques restent très hétérogènes et habituellement non évalués scientifiquement. La qualité des signaux EEG obtenus avec des appareils grand public est limitée par le faible nombre d'électrodes, le bruit environnemental et l'absence d'étalonnage clinique. Les effets observés peuvent relever de phénomènes non spécifiques : effet placebo, simple prise de conscience corporelle, régulation respiratoire, ou apprentissage attentionnel indépendant du signal EEG lui-même.

La curiosité, le désir des consommateurs et les effets de mode pourraient faciliter la diffusion de neurotechnologies dans des contextes ludiques ou récréatifs. L'absence de lien annoncé avec la médecine allège les contraintes réglementaires et les coûts de développement, alors que les marchés potentiels sont plus ouverts, ce qui est très attractif pour les entrepreneurs, en particulier les startups. Ces usages des neurotechnologies numériques soulèvent toutefois des interrogations sur leurs effets indésirables, d'autant plus importantes qu'il s'agit d'usages apparemment banals et attractifs, potentiellement destinés à un très large public, et échappant à toute évaluation prospective.

3. Les questions d'éthique posées par les neurotechnologies numériques

3.1 Introduction

Les questions éthiques soulevées par les neurotechnologies numériques ne sont pas nouvelles dans leurs principes, depuis celles qui sont liées aux progrès des technologies médicales jusqu'aux possibilités de manipulation des individus ou de leurs comportements⁹¹. Toutefois ces questions revêtent une acuité particulière dans le cas des neurotechnologies numériques, puisque nos perceptions, nos souvenirs, nos sentiments, notre imagination, nos décisions et nos actions sont issus de l'activité de notre cerveau. Si les possibilités d'enregistrement (« lecture ») ou de modification directe (« écriture ») de l'activité cérébrale sont encore limitées, il est probable qu'elles augmenteront dans le futur, créant un potentiel croissant d'interférences avec le fonctionnement du cerveau, donc avec l'ensemble de l'activité mentale, consciente et inconsciente.

⁹⁰ Avis n°9 du CNPEN « [Métavers : enjeux d'éthique](#) », 2024.

⁹¹ Ces points sont développés par exemple par Goering S, Klein E, Specker Sullivan L, Wexler A, Agüera Y Arcas B, Bi G, Carmena JM, Fins JJ, Friesen P, Gallant J, Huggins JE, Kellmeyer P, Marblestone A, Mitchell C, Parens E, Pham M, Rubel A, Sadato N, Teicher M, Wasserman D, Whittaker M, Wolpaw J, Yuste R. Recommendations for Responsible Development and Application of Neurotechnologies. *Neuroethics*. 2021 14:365-386. doi: 10.1007/s12152-021-09468-6.

Des questions éthiques particulières liées aux neurotechnologies numériques sont en rapport avec les possibilités de modification des émotions, de l'identité et de l'agentivité humaines qui sont au cœur de ce qui constitue la personne. Elles comprennent également des questions importantes concernant le caractère privé des données neurales, les multiples possibilités de biais dans leur usage ou leur interprétation, et les interrogations liées à leur utilisation dans une vision d'augmentation des capacités humaines. Il en découle des interrogations concernant la liberté de choix des individus et l'équité de l'accès aux bénéfices éventuels découlant de l'usage de ces nouvelles technologies. La thématique globale qui regroupe ces diverses interrogations est celle du respect de l'autonomie humaine et du principe de non-manipulation, *a fortiori* de non-manipulation subliminale.

Enfin une dimension transversale réside dans le fait que le cerveau est un organe fragile dont le fonctionnement et les dysfonctionnements restent très mal compris, et ce malgré les progrès considérables déjà accomplis. Une extrême prudence doit donc s'appliquer aux approches visant à modifier son fonctionnement. Le cerveau possédant une grande plasticité, les effets à long terme de toute manipulation extérieure sont largement imprévisibles et difficiles à évaluer. Ceci est particulièrement important à considérer pour les personnes jeunes (enfants et adolescents), chez qui le système nerveux est à la fois particulièrement plastique et fragile (voir 3.7).

Il est ainsi important que le public soit conscient des enjeux soulevés par le développement des neurotechnologies numériques. Les conséquences éventuelles de l'élargissement de leurs utilisations, alors même que la communication dans ce domaine peut faire naître des attentes irréalistes et donner une impression d'innocuité, doivent être analysées. Des débats associant des experts issus de la médecine, des neurosciences, des sciences humaines et sociales, du droit et un public large doivent être encouragés et s'appuyer sur des recherches de qualité. Si l'on tient compte des évolutions rapides, une réévaluation régulière, par exemple tous les cinq ans en lien avec les révisions de la loi de bioéthique, devrait permettre d'adapter les mesures aux développements de ces technologies et de la connaissance de leurs impacts.

Recommandations

- Mettre les neurotechnologies numériques à l'ordre du jour des États-généraux de la bioéthique et les inclure dans la préparation de la révision de la loi de bioéthique.
- Encourager la mise en place de procédures d'information et de formation destinées à familiariser les professionnels concernés, les patients, comme le grand public, aux bases des neurotechnologies numériques, à leur intérêt, leurs limites et leurs risques.

3.2. Questions d'éthique liées au traitement des données neurales

3.2.1. L'analyse des données permettant d'inférer des états mentaux

Les interfaces cerveau-machine permettent de recueillir des signaux électriques générés par l'activité cérébrale, essentiellement neuronale (voir 2.1 et Annexe 1-2). Ces signaux sont plus grossiers lorsque les enregistrements sont pratiqués à l'extérieur de la boîte crânienne et avec un nombre restreint de capteurs. D'autres technologies, souvent regroupées sous le nom d'imagerie cérébrale⁹², font appel à des appareils habituellement de grande taille qui permettent de recueillir des informations sur l'activité cérébrale avec une résolution spatiale et temporelle qui augmente progressivement. Dans tous les cas, le déchiffrement ou l'interprétation de ces signaux fait appel à des traitements numériques

⁹² L'imagerie cérébrale est dite imagerie structurelle lorsqu'elle fournit des informations sur la structure du cerveau (imagerie par résonance magnétique IRM ou tomographie par émission de positons [TEP], tomographie par émission de positons [TEP], magnétoencéphalographie [MEG]). On inclut parfois l'EEG sous ses différentes formes parmi les méthodes d'imagerie cérébrale fonctionnelle (voir Glossaire et Annexe 1-2).

de complexité variable fondés de plus en plus sur des techniques d'apprentissage automatique. Les données ainsi recueillies, brutes ou déjà analysées à des degrés divers, sont des données cérébrales ou au sens large des données neurales⁹³, qui comprennent tous les paramètres structuraux et fonctionnels qui traduisent les propriétés et l'activité du cerveau, et du système nerveux en général.

Ces données soulèvent de nombreuses questions de nature scientifique : quelles informations donnent-elles sur les états mentaux ou le psychisme ? Permettent-elles d'identifier les personnes ? Quelles sont les limites et les biais possibles dans leur analyse et leur interprétation ?

Le fait que les données neurales soient en principe porteuses d'informations personnelles, parfois liées aux intentions, émotions ou états cognitifs de l'individu, soulève des questions éthiques en matière de vie privée. Même si pour l'heure ce n'est pas encore possible, certains craignent que ces technologies puissent ouvrir la voie à une atteinte à l'intimité psychique. De nombreux experts⁹⁴ demandent que soit donné un statut protégé aux données neurales, ce à quoi fait écho la rapporteuse spéciale de l'ONU sur le droit à la vie privée, insistant sur le fait que les données neurales sont des données sensibles⁹⁵.

Caractère identifiant des données neurales. Les travaux de recherche comparant les données neurales individuelles recueillies par différentes techniques montrent leur caractère identifiant ou potentiellement identifiant (voir 2.2.3). Les capacités d'identification des personnes à partir de leurs données neurales dépendent d'une part de la puissance des méthodes d'analyse et d'autre part de l'existence de bases de données pour effectuer des comparaisons ou des croisements. Si l'on tient compte des évolutions rapides dans ce domaine, il paraît raisonnable de considérer que les données neurales sont des données biométriques (démonstrées ou potentielles) tout comme les empreintes digitales, les traits du visage ou la séquence de l'ADN, et doivent de ce fait être considérées comme des données à caractère personnel sensibles.

Difficultés et limites de l'interprétation des données neurales. Les exemples actuels d'utilisation de données neurales pour différents types de réponses de prothèses viennent de travaux de recherche dans lesquels le taux d'erreur diminue au fil des perfectionnements mais est loin d'être nul. La fiabilité des interprétations peut être mise en cause si les technologies sortent du domaine de la recherche. En effet une erreur dans le décodage des signaux cérébraux utilisés pour générer la réponse d'une machine peut entraîner des actions indésirées ou priver l'utilisateur de ses capacités de communication. Cette incertitude pose aussi la question de la responsabilité en cas d'erreur d'interprétation ou de dommage : à qui imputer la faute — à l'utilisateur, au médecin prescripteur, au concepteur, au fabricant ?

Biais possibles dans l'analyse de données neurales. La plupart des systèmes d'interfaces cerveau-machine reposent sur des méthodes d'apprentissage automatique pour l'analyse des signaux cérébraux, et d'intelligence artificielle générative pour une partie de leur interprétation. Ces méthodes nécessitent des échantillons de données importants (banques de données publiques ou privées) et des enregistrements répétés chez un même sujet afin d'adapter les interprétations de la machine au fur et à mesure que le sujet apprend à la maîtriser. Les risques de biais existent à ces différents niveaux :

⁹³ Les données cérébrales au sens littéral concernent uniquement celles qui proviennent du cerveau, les « données neurales » couvrent le système nerveux en général, ce qui inclut aussi le cervelet, le tronc cérébral, la moelle épinière, tous les nerfs périphériques et le système nerveux végétatif. Dans les propos de beaucoup d'experts et dans cet avis le terme « données neurales » est préféré car il est moins limitatif et correspond mieux à la réalité. En effet les données neurales qui proviennent de régions du système nerveux différentes du cerveau donnent indirectement des informations sur l'activité du cerveau ou en lien avec celle-ci. Il est donc arbitraire d'isoler les « données cérébrales » et le terme « données neurales » correspond mieux aux types de données recueillies et analysées par les neurotechnologies numériques.

⁹⁴ Comme, par exemple, Yuste R. Advocating for neurodata privacy and neurotechnology regulation. Nat Protoc. 2023 18:2869-75. doi:10.1038/s41596-023-00873-0.

⁹⁵ Ana Brian Nougères. [Fondements et principes de la réglementation des neurotechnologies et du traitement des neurodonnées du point de vue du droit à la vie privée](#)

si les données d'apprentissage sont biaisées (par exemple du fait de données insuffisantes ou absentes chez certains groupes d'individus) ou de mauvaise qualité, les résultats du système le seront aussi. L'état émotionnel, l'âge des sujets, l'existence de pathologies associées, peuvent aussi influencer l'interprétation des données. En ce qui concerne l'intelligence artificielle générative, les biais potentiels ont été abordés dans l'avis n°7 du CNPEN⁹⁶. Dans un cadre médical, cela peut conduire à des erreurs potentiellement graves et à des discriminations discutées dans l'avis commun n°141 du CCNE et n°4 du CNPEN⁹⁷. L'exploration des biais et la mise au point de stratégies permettant de les éviter ne fait que débiter dans le domaine des interfaces cerveau-machine mais l'existence et les conséquences possibles de ces biais doivent être prises en compte dans toute évaluation.

Usages détournés des données neurales. La diffusion ou la commercialisation de données neurales pourrait conduire à des usages détournés, par exemple pour offrir des choix ciblés (à des fins commerciales, politiques...) ou pour surveiller les individus. Les pratiques existantes et le commerce par des courtiers spécialisés de données recueillies à partir de l'usage des smartphones⁹⁸ laissent penser qu'en l'absence de mesures de protection spécifiques, les données neurales pourraient être utilisées de cette manière. De plus, un système d'intelligence artificielle pourrait être exploité pour favoriser des états mentaux spécifiques, surveiller ou manipuler des comportements. Bien que largement spéculatif à l'heure actuelle, un tel scénario appelle une vigilance forte, un débat collectif et un encadrement réglementaire. En principe, le Règlement européen sur l'intelligence artificielle assure une protection contre les utilisations abusives ou simplement détournées, mais la maîtrise de traitements réalisés à distance, en particulier hors de l'Union européenne, est impossible en pratique. Au-delà d'usages commerciaux, des contrôles de type policier ou politique seraient parfaitement envisageables à partir de données neurales, menaçant ainsi les libertés fondamentales, d'autant que les capacités d'identification des individus augmenteront avec la quantité de données disponibles et le perfectionnement des méthodes d'analyse. De plus, les neurotechnologies, y compris invasives, pourraient être utilisées pour tenter d'obtenir des informations de personnes contre leur gré ou pour modifier leur comportement. Ces pratiques doivent être assimilées à « des traitements inhumains ou dégradants »⁹⁹, même si elles n'entraînent pas directement de souffrances physiques ou mentales. Il est du devoir moral des professionnels de la santé de refuser de mettre en œuvre de telles techniques dans de telles circonstances. Il paraît notamment indispensable que les associations médicales nationales et internationales et les conseils de l'ordre (ou équivalents) nationaux fassent état d'une prise de position ferme contre l'utilisation de telles méthodes, et que l'Association médicale mondiale (AMM) l'inclue explicitement dans les mises à jour de la déclaration d'Helsinki¹⁰⁰. En outre, les instances législatives et gouvernementales devraient exprimer clairement cette position.

Tension entre qualité du modèle d'apprentissage machine et minimisation des données. En principe les données personnelles recueillies doivent être réduites au minimum nécessaire¹⁰¹. Or lorsque des méthodes d'apprentissage machine sont utilisées pour les interfaces cerveau-machine, le minimum de données nécessaires et pertinentes pour obtenir un fonctionnement optimal n'est pas connu *a priori*. Ainsi la tentation peut être grande de vouloir recueillir un maximum de données disponibles, avec une augmentation potentielle des risques de mésusages.

Différences entre les analyses locales et à distance des données neurales. Lorsque des données neurales sont recueillies, elles peuvent être analysées au sein même du dispositif portatif, ou via un

⁹⁶ Avis n°7 « [Systèmes d'intelligence artificielle générative : enjeux d'éthique](#) », 2023

⁹⁷ Avis n°141 du CCNE et n°4 du CNPEN « [Diagnostic Médical et Intelligence Artificielle : Enjeux Ethiques](#) », 2022

⁹⁸ Le Monde - [Données personnelles en vente libre : les « data brokers », une industrie hors de contrôle](#), février 2025.

⁹⁹ Conseil de l'Europe - [L'interdiction de la torture](#)

¹⁰⁰ La [déclaration d'Helsinki](#) a été adoptée par l'assemblée générale de l'AMM en juin 1964 et, depuis cette date, est régulièrement mise à jour.

¹⁰¹ « Le principe de minimisation prévoit que les données à caractère personnel doivent être adéquates, pertinentes et limitées à ce qui est nécessaire au regard des finalités pour lesquelles elles sont traitées. » (CNIL – [définition de la minimisation](#))

ordinateur connecté au dispositif, ou encore être transmises à un ordinateur distant. Ces différences sont importantes car la transmission à distance augmente les risques de piratage des données, même lorsque les flux sont sécurisés. Pour prendre deux exemples très différents, la transmission de données peut concerner aussi bien les systèmes de stimulation cérébrale profonde en boucle fermée avec analyse à distance, que des dispositifs d'analyse de rythme de type électroencéphalographique dans un but non médical, comme le *neurofeedback*, qui permet à l'utilisateur de suivre ses « progrès » au cours du temps. Les données utilisées uniquement localement restent en principe privées, même si des questions de sécurité peuvent toujours exister. Les incertitudes sur les utilisations possibles doivent rendre extrêmement prudent dans la collecte et l'analyse à distance (centralisée par les prestataires) des données neurales. Les questions relatives à la localisation des traitements des données doivent donc être clairement mises en évidence dans les demandes de consentement, et des procédures sécurisées devraient être requises pour les transferts de données à distance. En outre, il faut noter que les traitements locaux ont l'avantage d'avoir une empreinte environnementale bien moindre que les traitements à distance qui sont susceptibles de faire appel à des centres de données, grands consommateurs de ressources.

Tension entre caractère sensible des données neurales et leur réutilisation. Les progrès scientifiques bénéficient de l'accès à de grandes quantités de données et les données neurales n'échappent pas à cette nécessité¹⁰². Dans ce cadre, des méthodes de standardisation des données neurales ont été développées, les rendant faciles à trouver, accessibles, interopérables (utilisables par différents programmes informatiques) et réutilisables¹⁰³. Les données publiquement accessibles sont d'ailleurs utilisées pour l'entraînement des systèmes d'apprentissage machine qui servent ultérieurement à interpréter des données recueillies sur de nouveaux sujets pour le développement des interfaces cerveau-machine. D'une manière générale, il faut rappeler la tension qui existe dans le domaine des données scientifiques entre la nécessité de protection de la vie privée et la mise à disposition de ces données à caractère personnel dans le cadre de la recherche. Ainsi, des études doivent être menées au sujet de la protection des données neurales, à l'instar de celles qui portent sur d'autres types de données sensibles.

Recommandations (Traitement des données neurales)

- Considérer toutes les données neurales comme des données à caractère personnel sensibles, et potentiellement directement identifiantes, au sens du Règlement général pour la protection des données (RGPD).
- Privilégier le traitement local des données neurales, à la fois pour des raisons de protection des données à caractère personnel et de minimisation de l'empreinte environnementale.
- Évaluer régulièrement les taux d'erreurs des dispositifs qui déclenchent des réponses en fonction de l'analyse de données neurales. Prévoir des mécanismes d'échappement ou de secours d'urgence, tout particulièrement si les réponses déclenchées automatiquement par l'analyse de données neurales sont susceptibles d'avoir des conséquences dangereuses.

3.2.2. Cybersécurité

Les interfaces cerveau-machine et les systèmes d'analyse des données qu'elles produisent sont des appareils numériques exposés, en plus des mésusages possibles, à des actes de malveillance (piratage - *hacking*). Si le système comprend un composant actif (par exemple une neuroprothèse ou

¹⁰² Rübél O, Tritt A, Ly R, Dichter BK, Ghosh S, Niu L, Baker P, Soltesz I, Ng L, Svoboda K, Frank L, Bouchard KE. The Neurodata Without Borders ecosystem for neurophysiological data science. *Elife*. 2022 11:e78362. doi:10.7554/eLife.78362.

¹⁰³ Ces caractéristiques sont résumées par l'acronyme anglais FAIR (*findable, accessible, interoperable and reusable* [càd trouvable, accessible, interopérable, réutilisable]). A ne pas confondre avec les laboratoires de la société Meta intitulés *Facebook Artificial Intelligence Research* (FAIR).

un dispositif de stimulation) ou bien nécessite des réglages réalisés à distance, un piratage pourrait conduire au détournement de son usage ou simplement à l'arrêt de son fonctionnement¹⁰⁴. Ces risques ne sont pas spécifiques des interfaces cerveau-machine mais ils sont d'une sensibilité particulière dans ce contexte. La dimension éthique correspondante concerne la nécessité d'informer les utilisateurs des problèmes de sécurité potentiellement liés aux interfaces cerveau-machine et, pour les entreprises qui les commercialisent, la nécessité de leur prise en compte lors de la conception des systèmes, de leur fabrication et de leur maintenance. Les Centres d'évaluation de la sécurité des technologies de l'information (CESTI) permettent dans ces situations d'apporter les éléments d'analyse et d'étude de robustesse permettant à une agence nationale telle que l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI)¹⁰⁵ de certifier la qualité de la sécurité des protocoles de chiffrement, de communication et de conservation des données traitées par les dispositifs numériques.

Recommandations (Cybersécurité)

- Analyser la cybersécurité des interfaces cerveau-machine dès la conception de prototypes.
- Équiper les interfaces cerveau-machine invasives de dispositifs de cybersécurité eux-mêmes vérifiés et certifiés par des organismes qualifiés, qui garantissent des réglages à distance sécurisés, et limitent les risques de prises de contrôle indésirées et les cyberattaques.

3.2.3. Les limites du consentement éclairé

L'utilisation des neurotechnologies numériques implique en principe plusieurs types de consentements. Dans le cadre médical, il faut distinguer d'une part le consentement à bénéficier de l'acte (par exemple, l'implantation d'un dispositif de stimulation, la mise en place d'une interface ou d'une neuroprothèse, voir 3.4.2) et, d'autre part, le consentement concernant l'utilisation des données qui sont recueillies.

Consentement concernant l'utilisation secondaire des données neurales en contexte médical. Le consentement à l'acte médical inclut le consentement au traitement des données pour le soin¹⁰⁶. En ce qui concerne l'utilisation secondaire des données, par exemple à des fins de recherche, l'espace européen des données de santé (EEDS¹⁰⁷) dispose que « *les citoyens peuvent refuser que leurs données fassent l'objet d'une utilisation secondaire, au moyen d'une procédure simple, réversible et transparente* »¹⁰⁸. Il s'agit donc par défaut d'une procédure de non-refus et non d'un consentement explicite. Dans la mesure où les données neurales sont considérées comme des données à caractère personnel sensibles, cette procédure de non-refus est insuffisante et devrait être remplacée par un consentement explicite.

Consentement concernant l'utilisation des données neurales en dehors du contexte médical. Si les données neurales sont considérées comme des données à caractère personnel sensibles, cela leur confère une protection particulière au regard du Règlement général pour la protection des données (RGPD), qui en interdit le traitement, à quelques exceptions près¹⁰⁹. Parmi ces exceptions, et d'un point de vue éthique, le consentement explicite de la personne concernée devrait être exigé, y compris pour l'utilisation à des fins de recherche ou de mise à disposition dans des bases de données ouvertes. En outre, les données neurales, que la personne ne peut pas contrôler, pourraient être utilisées pour

¹⁰⁴ La possibilité de ce type de piratage a été montrée pour les pacemakers cardiaques (notamment à la suite d'une « démonstration pratique » lors d'un [congrès sur la cybersécurité](#), 2018) et les cyberattaques des hôpitaux défraient régulièrement la chronique.

¹⁰⁵ Pour les liens de l'ANSSI avec les CESTI consulter le [site de l'ANSSI](#).

¹⁰⁶ Voir l'avis n°136 du CCNE sur « [L'évolution des enjeux éthiques relatifs au consentement dans le soin](#) », 2021.

¹⁰⁷ [European Health Data Space](#) (EHDS)

¹⁰⁸ Commission européenne – [Réutilisation des données de santé](#)

¹⁰⁹ Article 9, paragraphe 2, entre autres : consentement explicite de la personne concernée ; données manifestement rendues publiques par la personne concernée ; motifs d'intérêt public important ; fins archivistiques dans l'intérêt public, fins de recherche scientifique ou historique ou fins statistiques.

alimenter des algorithmes de recommandation. Dans tous les cas, les procédures de consentement doivent être concises et aussi claires que possible, inclure un exposé des incertitudes liées à l'état de l'art scientifique, et proposer l'option du consentement explicite à l'utilisation (*opt-in*). Cependant dans certains cas, les finalités de recueil de données neurales sont susceptibles d'évoluer en cours d'usage (par exemple au cours d'un jeu vidéo) et le consentement peut être difficile à recueillir relativement à ces évolutions. Comme cela est indiqué dans l'avis n°9 du CNPEN¹¹⁰, une réflexion spécifique sur ces difficultés d'information et de recueil de consentement dans le contexte des nouvelles technologies numériques, y compris des neurotechnologies, est nécessaire.

Recommandations (Consentement à l'utilisation des données neurales)

- Dans tous les cas d'usage des neurotechnologies numériques, veiller à ce que les informations fournies à la personne concernée soient simples, claires et adaptées.
- En contexte médical, mettre en place des processus de consentement explicite pour toutes les utilisations secondaires des données neurales.
- Hors contexte médical, recueillir explicitement le consentement de la personne concernée pour l'utilisation de ses données neurales.
- Interdire l'utilisation de données neurales pour le ciblage à visée commerciale et plus généralement, pour l'alimentation d'algorithmes de recommandation quels qu'en soient les objectifs.
- Encourager les recherches sur le recueil de consentement à l'utilisation des données neurales pour renforcer la protection des personnes concernées.

3.3. Questions d'éthique liées à la recherche

Les recherches sur ou utilisant des neurotechnologies numériques sont un domaine dynamique aux frontières des neurosciences et des sciences de l'ingénieur. Il est d'autant plus crucial de les encourager et de les soutenir que les enjeux pour la santé sont importants. Lorsque ces recherches ont un but médical, notamment thérapeutique, il est important que dès la conception des projets ceux-ci soient adaptés au mieux en tenant compte de l'avis des personnes concernées (patients, familles, aidants).

En fonction de la nature du protocole de la recherche et de son caractère invasif ou non, sa mise en œuvre ne peut se faire qu'en respectant les textes en vigueur. Le Règlement européen 2017/74 relatif aux dispositifs médicaux impose une autorisation – en France celle de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM), ainsi qu'un avis favorable d'un comité d'éthique reconnu par la loi – en France un Comité de protection des personnes (CPP). Le Code de la santé publique (articles L1121-1 à L1128-12 relatifs aux Recherches impliquant la personne humaine – RIPH) spécifie par ailleurs que les recherches non-interventionnelles, c'est-à-dire purement observationnelles (RIPH 3), nécessitent un avis favorable d'un CPP¹¹¹. Dans tous les cas, il convient que les investigateurs et promoteurs identifient précisément le cadre légal dans lequel se situe leur recherche et les contraintes qui en découlent.

¹¹⁰ Avis n°9 « [Métavers : enjeux d'éthique](#) », 2024.

¹¹¹ « La recherche mentionnée au 1° de l'article L. 1121-1 ne peut être mise en œuvre qu'après avis favorable du comité de protection des personnes mentionné à l'article L. 1123-1 et autorisation de l'autorité compétente mentionnée à l'article L. 1123-12. [...] Les recherches mentionnées au 2° de l'article L. 1121-1 et les recherches non-interventionnelles ne peuvent être mises en œuvre qu'après avis favorable du comité de protection des personnes mentionné à l'article L. 1123-1. » ([Code de la santé publique, Article L1121-4](#)). La liste des techniques de recueil et de collecte de données au moyen de capteurs ou de méthodes d'imagerie pouvant être mises en œuvre dans le cadre de recherches mentionnées au 2° de l'article L. 1121-1 du code de la santé publique est définie par l'[arrêté du 12 avril 2018 \(modifié en 2021\) – Annexe 1, 7°](#).

En pratique, il existe une tension entre les exigences légales et les capacités des CPP à évaluer des projets relatifs aux neurotechnologies numériques hors contexte médical, pour lesquels ils n'ont pas systématiquement la disponibilité ni les compétences scientifiques spécifiques. De ce fait, ces projets sont souvent évalués par des comités d'éthique locaux ou institutionnels (par exemple les comités d'éthique pour la recherche (CER) d'organismes de recherche et d'universités), qui n'ont actuellement pas de statut légal.

Tensions liées à la communication des résultats. Dans le domaine des neurotechnologies comme dans d'autres, lorsque les résultats de recherche sont publiés, on constate l'existence d'un biais systématique en faveur des résultats positifs, au détriment des résultats négatifs. En outre, la publication soulève des questions spécifiques dans le domaine des neurotechnologies numériques, les risques d'usages détournés étant importants. En effet, des technologies initialement conçues pour des buts médicaux peuvent être détournées à des fins de surveillance, d'influence, ou de manipulation cognitive. Cette tension entre ouverture de la science et sécurité doit être gérée au cas par cas avec des stratégies de publication adaptées. Une autre tension est liée au développement de neurotechnologies numériques par des entreprises privées, qui sont susceptibles de ne pas vouloir rendre publics leurs procédures et leurs résultats, ce qui génère des incertitudes pour l'évaluation scientifique, éthique et légale des dispositifs expérimentés, voire fabriqués.

Questions soulevées par la participation de volontaires sains à des études scientifiques relatives à l'activité cérébrale. Même dans un cadre de participation volontaire, le fait de se prêter à une expérimentation relative à l'activité cérébrale et aux possibilités (non-invasives) de l'évaluer et de la modifier, peut susciter des inquiétudes identitaires et sociales chez les participants : interrogations sur l'image de soi, peur de franchir une limite floue entre optimisation et transgression, crainte d'un effet de stigmatisation, considérations de justice et d'égalité, interrogations sur de futurs usages en particulier en milieu professionnel, etc. La possibilité de se retirer de l'expérimentation à tout moment et sans fournir d'explications doit ainsi être particulièrement soulignée lors de la phase d'information des participants, qui doit inclure également une procédure claire de prise en charge en cas de découverte inopinée d'ordre médical (« incidentalome ») dans les données neurales recueillies¹¹².

Tension liée à l'utilisation en recherche de la stimulation cérébrale. Les recherches chez les volontaires sains ne peuvent concerner que des stimulations non-invasives. Si les stimulations utilisées ont des intensités modérées, respectant strictement les protocoles les plus prudents et si les résultats sont peu probants, une tension éthique peut apparaître entre l'augmentation de la puissance ou de la durée de stimulation et la sécurité ou la santé des participants volontaires. Ceci est d'autant plus vrai qu'il est difficile d'établir des seuils précis et que les effets à long terme sont mal connus. En outre, certaines expérimentations avec stimulation peuvent avoir des conséquences transitoires sur l'agentivité, dont le participant doit être informé.

Recommandations (Recherche)

- Pour les recherches relatives aux neurotechnologies numériques à visée médicale, inclure des représentants des patients dans la conception du protocole, en étant attentif à leur diversité.
- Pour toute recherche impliquant des neurotechnologies numériques chez des personnes humaines, à vocation médicale ou non, dans un cadre public ou privé, exiger systématiquement un avis favorable d'un Comité de protection des personnes (CPP), en

¹¹² Voir les questions soulevées par les découvertes fortuites (incidentalomes) au cours d'examens complémentaires notamment radiologiques abordées dans l'avis n°141 du CCNE et n°4 du CNPEN « [Diagnostic Médical et Intelligence Artificielle : Enjeux Éthiques](#) », 2022.

conformité avec la législation. Encourager les CPP à faire appel à des experts des neurotechnologies numériques.

- Mettre en place un suivi éthique de ces recherches parallèlement au suivi technique.

3.4. Questions d'éthique liées à l'utilisation médicale

D'une manière générale, les neurotechnologies utilisées en médecine corrigent des symptômes ou compensent des déficits mais ne modifient pas la cause ou l'évolution des maladies. Pour cette raison, leur développement ne diminue en aucune manière la nécessité de recherches et d'innovations pour d'autres types de traitements. En outre, comme pour tout traitement en médecine, au regard des bénéfices que peuvent en tirer les malades, il faut tenir compte des complications et des effets indésirables des neurotechnologies. Il faut également prendre en compte les difficultés spécifiques comme la maintenance au long cours des dispositifs implantés. Enfin il est essentiel de répondre aux besoins exprimés par les patients.

3.4.1. Bienfaisance et non-malfaisance

Des effets latéraux indésirables des dispositifs de stimulation sur le fonctionnement cérébral sont possibles et peuvent être difficiles à identifier s'ils sont rares ou s'ils concernent des modifications du comportement ou de l'humeur¹¹³. L'écoute des patients et de leurs proches est particulièrement importante et doit faire l'objet de stratégies proactives de la part des équipes soignantes, ce d'autant plus lorsque les technologies ou les indications sont nouvelles, et qu'il est impossible de prévoir tous les effets latéraux indésirés. Les dispositifs en boucle fermée (avec stimulation adaptée en fonction des informations recueillies) peuvent présenter des difficultés particulières à cet égard du fait de l'absence de traces précises de leurs actions et de la difficulté à reproduire leurs circonstances de réponse. Les interfaces cerveau-machine qui génèrent une réponse d'une machine (mouvement d'une prothèse ou d'un membre paralysé directement stimulé ou production de langage) posent des questions particulières qui doivent être soigneusement évaluées et anticipées pour respecter l'autonomie du patient (sa volonté d'agir) qui dans certaines circonstances peut engager sa responsabilité. À titre d'exemple, pour les neuroprothèses permettant la production de langage, il faut tenir compte aussi bien de l'exactitude technique du décodage de l'activité cérébrale, que de l'authenticité de l'interprétation en fonction de l'intention de la personne et de sa volonté de communiquer ou non certains aspects de son discours intérieur¹¹⁴. Ces points sont d'autant plus critiques que l'activité cérébrale recueillie par l'interface cerveau-machine s'éloigne de la commande motrice exécutive pour se rapprocher du discours intérieur.

Comme dans les autres domaines de la médecine, seules des études de qualité respectant les règles éthiques applicables et ayant obtenu les autorisations réglementaires peuvent être envisagées. Lorsqu'il s'agit d'approches nouvelles avec une dimension de recherche, il est particulièrement important qu'une communication objective, complète et transparente permette à la communauté médicale et scientifique d'évaluer la qualité du travail et la valeur des résultats rapportés. L'exemple récent de la pose d'une interface cerveau-machine invasive pour laquelle les autorisations requises n'étaient pas obtenues, et le protocole et les résultats n'étaient pas détaillés, à rebours des attentes

¹¹³ Nassery A, Palmese CA, Sarva H, Groves M, Miravite J, Kopell BH. Psychiatric and Cognitive Effects of Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2016 16:87. doi:10.1007/s11910-016-0690-1 ; Pomes MV, D'Urso G, Bove I, Cavallo LM, Della Ragione L, Palmiero C, Perrotta F, Esposito F, Somma T. Psychiatric Outcomes of Subthalamic Nucleus Deep Brain Stimulation: A Systematic Review of Short- and Long-Term Effects. *Brain Sci.* 2025 15:566. doi:10.3390/brainsci15060566 ; Eliufoo E, Kamuyalo C, Yusheng T, Nyundo A, Yamin L. The safety profile of subthalamic nucleus and globus pallidus internus deep brain stimulation for Parkinson's diseases: A systematic review of perioperative complications and psychological impacts. *Langenbecks Arch Surg.* 2025 410:131. doi:10.1007/s00423-025-03674-z.

¹¹⁴ Rainey S, Maslen H, Mégevand P, Arnal LH, Fournier E, Yvert B. Neuroprosthetic Speech: The Ethical Significance of Accuracy, Control and Pragmatics. *Camb Q Healthc Ethics.* 2019 28:657-70. doi:10.1017/S0963180119000604.

minimales pour la communication des travaux médico-scientifiques¹¹⁵, doit rendre particulièrement prudent.

En outre, les dispositifs implantés sont soumis à l'usure, d'autant que le caractère imparfait de leur biocompatibilité entraîne une réaction des tissus qui peut accélérer leur perte d'efficacité ; ils peuvent également être soumis aux interférences de champs électriques ou magnétiques externes. Leur maintenance suppose le changement périodique de pile ou le rechargement par contact, ainsi que le remplacement des pièces défectueuses et la mise à jour des éléments logiciels. Ces éléments induisent des conséquences pour les patients : perte d'efficacité du dispositif, nouvel acte chirurgical, risques de rupture du suivi à long terme du matériel (par exemple, incompatibilité de nouveaux dispositifs). En outre, une défaillance (faillite, décision politique commerciale, etc.) des entreprises qui fournissent ces dispositifs peut porter préjudice aux patients si la maintenance et la mise à jour ne peuvent plus être assurées dans de bonnes conditions, voire plus du tout¹¹⁶. Cette situation a été qualifiée de "*neuroabandonment*"¹¹⁷ (« neuroabandon »).

Recommandations (Usages médicaux)

- Limiter les usages médicaux des neurotechnologies numériques à des indications clairement définies, répondant à des besoins reconnus par le consensus scientifique et validés par la Haute Autorité de Santé.
- S'assurer que le patient a reçu, sous une forme simple et adaptée, une information complète et précise au sujet de l'intervention envisagée, y compris concernant les incertitudes et les risques qui y sont liés.
- Développer des procédures pour aider les patients porteurs d'un dispositif neurotechnologique à faire face à la cessation d'activité d'un fournisseur ou à d'autres aléas ayant des conséquences sur la continuité du traitement.

3.4.2 Consentement relatif à l'acte médical

Le consentement repose sur les mêmes principes que pour les autres actes médicaux¹¹⁸ avec les particularités liées au caractère inhabituel de la mise en place d'un dispositif de stimulation ou d'une interface cerveau-machine et aux inconnues qui peuvent subsister sur les mécanismes d'action et les effets indésirables possibles. En outre, la nature même de la pathologie neurologique ou psychiatrique pour laquelle les indications peuvent être proposées peut interférer avec la réflexion préalable au consentement. Une question éthique particulière concerne les patients souffrant de pathologies sévères qui altèrent le jugement ou la communication, ou qui n'ont pas encore d'autonomie légale (mineurs). Lorsque les interfaces cerveau-machine et les neuroprothèses sont proposées à des personnes paralysées qui ne peuvent ni écrire, ni parler, mais dont le jugement n'est pas altéré, la qualité de la communication avec la personne concernée et la réalité de son consentement doivent être évaluées par des personnes qui ne sont pas impliquées dans la mise en œuvre de l'implantation du dispositif (personne de confiance). Par ailleurs, il est nécessaire de considérer l'évolution des procédures de consentement après la mise en service du dispositif, par exemple du fait de mises à jour ou de modifications des protocoles. En effet, la mise en œuvre d'une

¹¹⁵ Neuralink brain chip: advance sparks safety and secrecy concerns. Drew L. Nature. 2024 627:19. doi:10.1038/d41586-024-00550-6.

¹¹⁶ Van Stuijvenberg OC, Bredenoord AL, Broekman MLD, Jongsma KR. Leaving Users in the Dark: A Call to Define Responsibilities toward Users of Neural Implanted Devices. AJOB Neurosci. 2022 13:233-6. doi:10.1080/21507740.2022.2126545. Voir aussi le compte rendu sur un [site consacré aux technologies digitales](#).

¹¹⁷ Okun MS, Marjenin T, Ekanayake J, Gilbert F, Doherty SP, Pilkington J, French J, Kubu C, Lázaro-Muñoz G, Denison T, Giordano J. Definition of Implanted Neurological Device Abandonment: A Systematic Review and Consensus Statement. JAMA Netw Open. 2024 7:e248654. doi:10.1001/jamanetworkopen.2024.8654 ; Sankary LR, Zelinsky M, Machado A, Rush T, White A, Ford PJ. Exit from Brain Device Research: A Modified Grounded Theory Study of Researcher Obligations and Participant Experiences. AJOB Neurosci. 2022 13:215-26. doi:10.1080/21507740.2021.1938293.

¹¹⁸ Avis n°136 du CCNE [« L'évolution des enjeux éthiques relatifs au consentement dans le soin »](#), 2021.

stimulation cérébrale peut perturber les capacités d'évaluation du patient, y compris relativement à l'expression de son consentement. En outre, le retrait éventuel du consentement par le patient pour l'utilisation secondaire de ses données ne doit pas compromettre l'utilisation thérapeutique prévue du dispositif.

3.4.3. Équité d'accès

Certains dispositifs de stimulation cérébrale profonde sont utilisés depuis plusieurs dizaines d'années en neurologie et leur mise en place est effectuée dans un nombre croissant d'hôpitaux. D'autres approches en cours de développement utilisant des technologies d'interface cerveau-machine et des équipements sophistiqués, comme les neuroprothèses ou les exosquelettes, sont accessibles uniquement dans des centres très spécialisés, dans le cadre de recherches, et leur prix de revient initial peut être très élevé. Leur mise en place et leur suivi ont aussi des coûts importants et nécessitent des patients motivés et formés, autant d'obstacles potentiels à la diffusion de ces méthodes. Les tensions soulevées sont les mêmes que dans les autres domaines de la médecine et ont été abordées dans l'Avis n°135 du CCNE¹¹⁹.

3.5. Questions d'éthique liées à l'utilisation à des fins d'« augmentation »

Les usages de neurotechnologies numériques sont encore peu répandus en dehors du contexte médical mais de nombreuses applications et dispositifs sont en cours de développement avec des objectifs variés, allant de la facilitation des interactions humain-machine aux applications ludiques ou de bien-être, et aux possibilités de contrôle et d'amélioration des performances. Nous aborderons successivement les interrogations générales liées au désir d'utiliser les neurotechnologies dans le but d'améliorer ou d'augmenter les capacités humaines, puis les questions éthiques spécifiques à certains usages proposés.

3.5.1. Désir d'augmentation des performances et arguments infondés

Le développement des neurotechnologies numériques s'inscrit dans un contexte marqué par un désir d'augmentation des capacités humaines, largement imprégné par les courants transhumanistes^{120,121} et la science-fiction. Ainsi, les capacités humaines étant limitées, il serait crucial d'utiliser les progrès de la biologie et de la technologie pour les augmenter. Il ne s'agit pas ici de débattre des fondements historiques ou philosophiques de ces visions, mais plutôt de dissiper certaines idées fausses, mais répandues, qui entravent la réflexion et peuvent occulter les problèmes réels posés par les neurotechnologies.

L'idée infondée selon laquelle les humains n'utiliseraient qu'une petite part de leur capacité cérébrale. La devise d'une société développant des interfaces cerveau-machine¹²² repose sur la croyance qu'un blocage empêcherait l'accès à certaines capacités du cerveau humain. Or aucune donnée scientifique ne corrobore cette vision. En revanche, il est bien documenté que des facteurs tels que la malnutrition, les stress majeurs, les agents toxiques (environnementaux ou « drogues » consommées de plein gré), ou infectieux, en particulier durant le développement, avant ou après la naissance, peuvent diminuer les capacités cérébrales, parfois de manière irréversible. À l'inverse, les

¹¹⁹ Avis n°135 du CCNE « [Accès aux innovations thérapeutiques : Enjeux éthiques](#) », 2020.

¹²⁰ Gilbert Hottois « Philosophie et idéologies post/transhumanistes » Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 2018. Voir aussi Jean-Michel Besnier « [L'avenir du futur n'est pas garanti](#) » Spirale, n°10 - Novembre 2024.

¹²¹ Voir également l'avis n°138 du CCNE « [L'eugénisme de quoi parle-t-on ?](#) », 2021, qui souligne en conclusion « *Si le transhumanisme ne peut être assimilé à l'eugénisme de par l'absence de transmissibilité à la descendance de ses visées d'amélioration, le CCNE attire l'attention sur les dérives possibles d'un tel courant de pensée risquant de définir un prototype d'humain « meilleur » selon des critères de performance réduisant la diversité des manières d'être humain [...]* »

¹²² [Neuralink](#) - "Our mission: Create a generalized brain interface to restore autonomy to those with unmet medical needs today and unlock human potential tomorrow" (Notre mission: créer une interface cerveau-machine généralisée pour [...] déverrouiller le potentiel humain demain).

effets positifs sur ces mêmes capacités d'une alimentation correcte, de l'éducation, des activités intellectuelles, des interactions sociales positives et de l'exercice physique, sont bien démontrés.

Le désir d'augmenter certaines capacités mentales par des moyens chimiques ou technologiques a été abordé dans l'avis n°122 du CCNE¹²³. En plus des questions éthiques qu'elles soulèvent, la question de l'efficacité de ces approches reste ouverte. On ne peut exclure des découvertes qui ouvriraient des possibilités nouvelles, mais les données objectives actuelles sont bien en deçà des visions ou des annonces optimistes. En effet, les capacités cognitives reposent sur le fonctionnement harmonieux de dizaines de milliards de neurones, et les possibilités de renforcer ce fonctionnement par des manipulations physiques à large échelle restent, jusqu'à preuve du contraire, très limitées. De plus, les performances cérébrales sont distribuées fonctionnellement. Chaque région corticale a une spécialisation, mais est en interaction constante avec d'autres régions du cortex et des structures sous-corticales (thalamus, ganglions de la base, etc.) qui en orchestrent et contrôlent l'activité. Une augmentation artificielle localisée de certaines fonctions intellectuelles, si elle était possible, pourrait se faire au détriment d'autres capacités, comme on l'observe dans certaines conditions pathologiques¹²⁴.

Certains aspects trompeurs des comparaisons entre cerveau et ordinateur sont probablement renforcés par le succès actuel du terme « intelligence artificielle ». Toutefois, bien que cerveau et ordinateur traitent tous deux très efficacement des informations, leur fonctionnement est fondamentalement différent. Les perspectives d'hybridation complète entre l'humain et la machine, sous-jacentes à certains discours sur les neurotechnologies¹²⁵, relèvent de la science-fiction, comme l'idée qu'on puisse transférer directement tout le contenu informationnel du cerveau vers une machine ou transmettre au cerveau une grande quantité d'informations via un port numérique ou tout autre dispositif. Les obstacles rencontrés pour concevoir des neuroprothèses sensorielles simples illustrent la difficulté de ce dernier point.

L'usage abusif de raccourcis qui attirent l'attention. La « lecture des pensées » ou l'« utilisation d'un ordinateur par la pensée » évoquent des pouvoirs magiques sans aider à comprendre ce que permettent réellement les neurotechnologies. Pour ne pas renforcer les malentendus, ces expressions demanderaient un développement plus précis ou devraient simplement être évitées. Les succès encore préliminaires dans le traitement de certains déséquilibres neurologiques ou psychiatriques graves ne permettent pas de conclure qu'une augmentation maîtrisée du fonctionnement normal du cerveau est technologiquement accessible dans un avenir proche. De même, les progrès remarquables du décodage de l'activité corticale lors de tâches motrices ou visuelles ne signifient pas qu'on puisse « lire dans les pensées », malgré la confusion entretenue par les médias, voire par certains chercheurs.

Ces différents types de discours accompagnent souvent les avancées scientifiques et le rêve peut être vu comme un moteur de progrès. Cependant, la mise en avant de possibilités et de bénéfices extraordinaires peut être une manière de masquer des intérêts économiques bien réels et de favoriser de nouveaux moyens de contrôle des individus.

¹²³ Avis n°122 du CCNE [« Recours aux techniques biomédicales en vue de « neuro-amélioration » chez la personne non malade : enjeux éthiques »](#), 2013.

¹²⁴ Des cas rares d'augmentation surprenante de certaines capacités intellectuelles particulières sont rapportés en médecine et en psychiatrie. Cela peut faire suite à des lésions cérébrales et s'accompagne habituellement d'une diminution des autres capacités intellectuelles. Le Monde - [Se réveiller du jour au lendemain en virtuose du piano : le syndrome du savant musical acquis](#), août 2025. Voir une revue plus technique dans Treffert DA. The savant syndrome: an extraordinary condition. A synopsis: past, present, future. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2009 364:1351-7. doi:10.1098/rstb.2008.0326.

¹²⁵ Voir par exemple Jean-Michel Besnier [« L'avenir du futur n'est pas garanti »](#), Spirale, n°10 - Novembre 2024. Au-delà des romans de science-fiction, le concept transhumaniste d'hybridation homme-machine (« cyborg ») est mentionné par exemple dans un influent rapport financé par la *National Science Foundation* en 2002 [« Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science »](#).

3.5.2. Utilisation de neurotechnologies numériques en dehors d'indications médicales

L'utilisation des neurotechnologies numériques en dehors de démarches thérapeutiques suscite de nombreuses questions. Le discours de certains développeurs, entreprises ou journalistes va souvent très au-delà des possibilités techniques réelles et brouille les frontières entre la réalité et le fantasme. N'étant pas proposés dans un but médical, ces dispositifs échappent souvent aux contraintes habituelles de ce cadre, ainsi qu'aux exigences de preuve d'efficacité et d'innocuité. C'est en particulier le cas des dispositifs en vente par correspondance sur internet, par des vendeurs internationaux. Ils peuvent néanmoins relever de la législation européenne (Règlement européen relatif aux dispositifs médicaux, Règlement général pour la protection des données, Règlement européen sur l'intelligence artificielle) selon leur nature et l'utilisation qu'ils font des données personnelles recueillies et de l'inclusion de techniques d'intelligence artificielle. En particulier, tous les dispositifs non-invasifs de stimulation cérébrale électrique ou magnétique sont considérés par le règlement d'exécution 2022/2347 de la Commission européenne comme des dispositifs médicaux de classe III¹²⁶, qui est la classe la plus contrôlée¹²⁷. En effet si les dispositifs sont eux-mêmes non-invasifs, les courants électriques ou les champs magnétiques qu'ils génèrent pénètrent bien à l'intérieur du crâne, ce qui est également le cas des technologies récentes utilisant les ultrasons.

Même si la distinction entre « normal » et « pathologique », ou entre « soin » et « augmentation » peut soulever des questions (voir 3.6.2), les indications actuelles ou à court terme des neurotechnologies invasives concernent uniquement des maladies ou handicaps neurologiques ou psychiatriques sévères, résistants aux autres traitements. Il en est de même des nouvelles technologies qui permettent de réaliser des lésions cérébrales sans ouverture de la peau (à l'aide de rayons gamma ou d'ultrasons par exemple). En l'absence de justification médicale, même la demande insistante éventuelle de personnes « saines » ne saurait en aucun cas justifier la mise en place de tels dispositifs ou la réalisation de telles interventions, qui constitueraient une faute déontologique, exposant en France les praticiens à des poursuites pénales.

En ce qui concerne les dispositifs de stimulation non-invasifs ils peuvent être proposés par des sociétés commerciales en dehors du cadre médical, pour des effets présomptifs de bien-être ou de renforcement de capacités comme la mémoire. Ils soulèvent les mêmes questions que les dispositifs médicaux, et s'ils ont une efficacité réelle au-delà des effets placebo, ils sont, jusqu'à preuve du contraire, susceptibles d'avoir des effets latéraux indésirables dont la détection et la caractérisation nécessitent des études soigneuses. Un rapport récent d'un comité scientifique et technique¹²⁸ dépendant de la Commission européenne conclut que si les risques à court terme des stimulations cérébrales non-invasives sont faibles lorsqu'elles sont utilisées dans un environnement médical par des professionnels qualifiés et dans le respect des contre-indications et des paramètres validés, les usages incontrôlés peuvent présenter des risques. Il n'y a pas de donnée scientifique permettant d'évaluer de tels risques en particulier à long terme, ce qui incite à la prudence.

La diffusion rapide de l'usage d'outils numériques (*smartphones*, réseaux sociaux, systèmes d'intelligence artificielle générative) dans la population, et les transformations sociales qu'ils engendrent, incitent à anticiper l'impact potentiel d'une banalisation des usages des neurotechnologies numériques, quelles que soient les incertitudes actuelles sur leur utilité et leur efficacité. Une réflexion éthique est indispensable, prenant en compte à la fois les raisons d'être de

¹²⁶ [Journal officiel de l'Union européenne du 2-12-2022](#)

¹²⁷ CMED - [Guide MDCG 2021-24 sur la classification des dispositifs médicaux](#)

¹²⁸ SCHEER (*Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks*), Preliminary Scientific Opinion on health hazards and risks associated with the use of brain stimulators for non-medical purpose as indicated in group 6 of Annex XVI to Regulation (EU) 2017/745, [preliminary version](#) adopted on 28 November 2025.

ces usages, les avantages supposés pour le public et les conséquences potentielles. Les enjeux économiques sont clairs, d'autant que ces technologies suscitent l'intérêt de grands groupes internationaux du domaine du numérique, mais des questions importantes portent sur le respect l'autonomie et de la vie privée des personnes, ainsi que sur les notions d'« optimisation » et d'« augmentation » des capacités et des performances.

Recommandations (Usages non-médicaux)

- En dehors d'indications médicales, interdire l'utilisation des dispositifs neurotechnologiques invasifs (interfaces cerveau-machine, dispositifs de stimulation), ainsi que des techniques de lésion intracérébrale sans ouverture de la peau.
- Considérer que tout dispositif non-invasif de modulation ou de stimulation physique directe de l'activité cérébrale (par des courants électriques, champs magnétiques, mais aussi ultrasons ou autres processus similaires) sont des dispositifs médicaux, conformément à la réglementation européenne, en prévoyant les modalités appropriées de contrôle des ventes à distance (internet).

3.5.3. Questions d'éthique liées aux usages en milieu professionnel

Des interfaces cerveau-machine ont déjà été utilisées en contexte professionnel dans le but d'évaluer l'attention d'opérateurs et d'améliorer la qualité de leurs actions. La diminution des risques pour les personnes dont la sécurité dépend des performances du professionnel est souvent mise en avant (voir 2.3.2). Il existe une vaste gamme de dispositifs explorés ou envisagés allant de la simple détection de somnolence sans faire appel à des interfaces cerveau-machine jusqu'à des méthodes plus complexes de suivi de l'attention ou de la charge cognitive¹²⁹. La détection de certaines activités cérébrales pour piloter des instruments¹³⁰ ou déclencher des réactions rapides sans passer par une action musculaire est en outre envisagée¹³¹, de même que la mise au point de méthodes de stimulation pour « augmenter » les performances¹³². Ces types d'usages sont susceptibles d'améliorer la sécurité ou l'efficacité de l'exécution de certaines tâches et susciter l'intérêt des personnes concernées. Ils peuvent aussi engendrer des tensions éthiques entre le gain espéré en sécurité ou en performance d'une part, et le respect de la législation relative au travail d'autre part. En outre, la personnalisation induite pourrait conduire à des dérives, en particulier concernant l'évaluation de la productivité individuelle ou les besoins de repos. De plus les conséquences de l'excès de confiance dans ces dispositifs ainsi que de leurs défaillances doivent être évaluées.

En outre, les dispositifs de suivi de l'activité cérébrale pourraient être utilisés par des employeurs à des fins de suivi ou de surveillance de l'activité des employés, éventuellement à leur insu, pour motiver les promotions, rémunérations, voire sanctions. Le consentement d'un employé à accepter l'usage d'un dispositif peut résulter de motivations personnelles, mais est nécessairement

¹²⁹ Douibi K, Le Bars S, Lemontey A, Nag L, Balp R, Breda G. Toward EEG-Based BCI Applications for Industry 4.0: Challenges and Possible Applications. *Front Hum Neurosci.* 2021 15:705064. doi:10.3389/fnhum.2021.705064 ; van Weelden E, van Beek CWE, Alimardani M, Wiltshire TJ, Ledegang WD, Groen EL, Louwerse MM. A Passive Brain-Computer Interface for Predicting Pilot Workload in Virtual Reality Flight Training. 2024 IEEE 4th International Conference on Human-Machine Systems, ICHMS 2024. doi:10.1109/ichms59971.2024.10555679.

¹³⁰ Esfandiari H, Troxler P, Hodel S, Suter D, Farshad M; Collaboration Group; Fürmstahl P. Introducing a brain-computer interface to facilitate intraoperative medical imaging control - a feasibility study. *BMC Musculoskelet Disord.* 2022 23:701. doi:10.1186/s12891-022-05384-9.

¹³¹ Dehais F, Ladouce S, Darmet L, Nong TV, Ferraro G, Torre Tresols J, Velut S, Labedan P. Dual Passive Reactive Brain-Computer Interface: A Novel Approach to Human-Machine Symbiosis. *Front Neuroergon.* 2022 3:824780. doi:10.3389/fnrgo.2022.824780.

¹³² Choe J, Coffman BA, Bergstedt DT, Ziegler MD, Phillips ME. Transcranial Direct Current Stimulation Modulates Neuronal Activity and Learning in Pilot Training. *Front Hum Neurosci.* 2016 0:34. doi:10.3389/fnhum.2016.00034. ; Zhu R, Ma X, Wang Z, Hui Q, You X. Improving auditory alarm sensitivity during simulated aeronautical decision-making: the effect of transcranial direct current stimulation combined with computerized working memory training. *Cogn Res Princ Implic.* 2025 10:11. doi:10.1186/s41235-025-00620-x.

influencé par des obligations, des incitations, des normes de comportement imposées ou implicites, ou la mise en place d'indicateurs évalués via le dispositif.

De même, l'usage d'interfaces cerveau-machine pourrait être envisagé pour la sélection et l'embauche de candidats. Dans ce contexte, il faut mettre en avant les questions de fiabilité¹³³ et de possibilité de généralisation des données enregistrées : la mesure de paramètres par une interface cerveau-machine reflète-t-elle de façon fiable une capacité professionnelle ? La réaction mesurée lors de l'embauche a-t-elle une valeur prédictive relativement aux compétences en conditions réelles ? Quoi qu'il en soit, l'utilisation de données neurales dans le cadre de procédures de sélection ou d'évaluation devrait être considérée comme discriminatoire et relever de l'article 225 du Code pénal¹³⁴. En effet, actuellement l'article 225-3 ne fait référence qu'aux « conséquences sur l'état de santé », mais il faut insister sur le fait que l'usage d'autres informations qui peuvent être déduites des données neurales doit être considéré comme discriminatoire même si les données ne concernent pas l'état de santé. En effet, leur fiabilité est incertaine, et elles relèvent de mesures intrusives sur un état cérébral, sans respecter l'autonomie de la personne, et non pas d'une évaluation objective de son activité professionnelle. En outre, le Règlement européen sur l'intelligence artificielle¹³⁵ interdit « la mise sur le marché, la mise en service ou l'utilisation de systèmes d'IA destinés à être utilisés pour déterminer l'état émotionnel de personnes physiques dans des situations liées au lieu de travail [...] » sauf « pour des raisons médicales ou de sécurité [...] ».

D'autres questions d'ordre éthique concernent la réversibilité de procédés d'augmentation et les conséquences de l'interruption d'usage. Ces interrogations concernent aussi bien le suivi de paramètres, comme l'attention ou la vigilance, que des procédés qui auraient pour but d'améliorer des réponses. Si un dispositif pouvait réellement améliorer une capacité particulière chez un professionnel, celui-ci pourrait-il l'utiliser en dehors de l'exercice de la profession ? Quelle serait la réversibilité des effets ? Quelles seraient les conséquences de la privation du dispositif (voir 3.6.2) ?

Compte tenu de ces nombreuses interrogations il est important qu'en France, l'utilisation éventuelle de tels dispositifs dans le contexte professionnel soit strictement encadrée par le législateur et soumise à l'ensemble des procédures et des instances impliquées par le droit du travail. L'évaluation des bénéfices réels pour le but poursuivi et la restriction de l'usage des données recueillies font également partie des paramètres à apprécier.

Recommandations (Usages en milieu professionnel)

- Consulter les instances représentatives du personnel au sujet de l'utilisation de données neurales à des fins d'observation et de suivi des employés sur le lieu de travail, réaliser des expérimentations préalables et des études d'impact, et comparer avec d'autres solutions possibles.
- Proposer que l'usage de données neurales pour l'embauche, l'évaluation, la promotion, la sanction ou le licenciement d'employés soit considéré comme discriminatoire, au sens de l'article 225 du Code pénal, même si elles ne concernent pas l'état de santé de la personne.

¹³³ Cette remarque sur la fiabilité incertaine s'applique également à d'autres méthodes utilisées lors d'entretiens d'embauche...

¹³⁴ [Code pénal, Article 225-2](#) « La discrimination définie aux articles 225-1 à 225-1-2, commise à l'égard d'une personne physique ou morale, est punie de trois ans d'emprisonnement et de 45 000 euros d'amende lorsqu'elle consiste à : [...] 3° A refuser d'embaucher, à sanctionner ou à licencier une personne ; [...] 5° A subordonner une offre d'emploi, une demande de stage ou une période de formation en entreprise à une condition fondée sur l'un des éléments visés à l'article 225-1 ou prévue aux articles 225-1-1 ou 225-1-2 ; [...] 6° A refuser d'accepter une personne à l'un des stages visés par le 2° de l'article L. 412-8 du code de la sécurité sociale. » [Article 225-3](#) « Les dispositions de l'article précédent ne sont pas applicables : 1° Aux discriminations fondées sur l'état de santé, lorsqu'elles consistent en des opérations ayant pour objet la prévention et la couverture du risque décès, des risques portant atteinte à l'intégrité physique de la personne ou des risques d'incapacité de travail ou d'invalidité. Toutefois, ces discriminations sont punies des peines prévues à l'article précédent lorsqu'elles [...] se fondent sur la prise en compte des conséquences sur l'état de santé [...] de données issues de techniques d'imagerie cérébrale; ».

¹³⁵ [Règlement européen sur l'intelligence artificielle](#) Paragraphe 44.

- Encadrer les usages des neurotechnologies numériques en milieu professionnel, le cas échéant au regard des systèmes d'intelligence artificielle interdits et à « haut risque » tels que définis par le Règlement européen sur l'intelligence artificielle.

3.5.4 Questions d'éthique liées aux autres usages non médicaux

Questions d'éthique liées aux usages dans les activités sportives

L'utilisation de neurotechnologies numériques dans le cadre de compétitions sportives pourrait potentiellement permettre d'optimiser les performances si les données étaient fournies en temps réel à l'athlète ou à l'entraîneur. Les instances sportives doivent évaluer cette possibilité et statuer sur sa réglementation, au même titre que le suivi d'autres paramètres physiologiques, cardiovasculaires par exemple. En revanche, le recours à des dispositifs de stimulation cérébrale pour améliorer les performances relèverait clairement du dopage. Enfin la possibilité que la stimulation cérébrale non-invasive puisse éventuellement améliorer des performances physiques de manière retardée¹³⁶ devra faire l'objet d'une attention particulière étant donné l'impossibilité de la détecter.

Recommandation (Usages dans les activités sportives)

- Encadrer l'utilisation des données neurales lors des compétitions sportives et préciser la place des techniques de stimulation cérébrale parmi les procédés d'augmentation artificielle des performances physiques.

Questions d'éthique liées aux usages dans les jeux vidéo

Dans le contexte des jeux vidéo, les neurotechnologies numériques pourraient renforcer les comportements addictifs, déjà suscités par ces activités chez certains utilisateurs. Ce risque accru pourrait résulter, par exemple, du lien rapide et automatique entre une réponse cérébrale détectée par une interface cerveau-machine et la « récompense » accordée à l'utilisateur (voir Annexe 1-4.2). La génération automatisée de réponses de la machine mimant celles d'un interlocuteur humain serait un piège supplémentaire dans ce contexte. Ces risques doivent être pris en considération si les neurotechnologies numériques devenaient facilement accessibles, notamment chez des personnes vulnérables (adolescents, personnes isolées ou fragilisées).

Questions d'éthique liées aux usages impliquant des enjeux financiers

Le perfectionnement des neurotechnologies numériques pourrait permettre de détecter une prise de décision avant que celle-ci ne soit pleinement consciente¹³⁷. Outre les erreurs inévitables, le fait de court-circuiter les processus normaux de réflexion diminuerait le contrôle de la personne. L'utilisation d'interfaces cerveau-machine pour toute prise de décision doit donc être proscrite, *a fortiori* si celle-ci comporte des enjeux financiers, quels qu'en soient les montants. Cela concerne les jeux de hasard et les paris en ligne, ainsi que les achats sur internet, et les investissements financiers y compris en cryptomonnaies. Il y a là une tension entre les intérêts commerciaux des sociétés qui développent de tels dispositifs et la nécessité de protéger le public.

¹³⁶ Angius L, Pascual-Leone A, Santarnecchi E. Prog Brain Res. Brain stimulation and physical performance. 2018 240:317-39. doi:10.1016/bs.pbr.2018.07.010.

¹³⁷ L'existence de signatures neurales des décisions est un sujet de recherche mais cette possibilité doit être envisagée, d'autant que même si le processus de décision lui-même n'est pas détecté, les ébauches de réponses motrices qui lui succèdent peuvent l'être alors qu'il ne s'agit que d'ébauches de réponse que le sujet peut ensuite annuler volontairement.

Recommandation (Usages impliquant des enjeux financiers)

- Interdire les dispositifs fondés sur l'induction de réponses numériques à partir d'enregistrements d'activité cérébrale dans le contexte des jeux de hasard, de paris avec enjeux monétaires, d'achats, d'enchères à distance, de gestion de flux financiers, et plus généralement pour toute activité de prise de décision ayant des conséquences financières pour l'utilisateur.

Questions d'éthique liées aux usages de « bien-être » ou d'améliorations subjectives

Ces systèmes sont habituellement proposés en dehors d'applications médicales, ce qui permet leur vente au grand public sans évaluations ni contrôles obligatoires. Ces développements s'inscrivent dans une tendance plus large de technologisation de la performance cognitive, de la relaxation et de la gestion du stress. La prolifération d'officines commerciales de *neurofeedback* illustre cette dynamique. Beaucoup de ces acteurs opèrent sans supervision professionnelle qualifiée et sans mécanismes garantissant la sécurité des utilisateurs. Dans certains cas, des personnes vulnérables (par exemple, familles d'enfants présentant des troubles de l'attention, personnes anxieuses) sont exposées à des pratiques coûteuses, peu efficaces et parfois trompeuses. Les questions d'éthique soulevées par ces développements ont des points communs avec celles que posent d'autres pratiques de « médecines alternatives » et apparentées. Les risques sont liés aux effets latéraux nocifs éventuels qui ne sont pas évalués, au retard de diagnostic et de prise en charge efficace de troubles médicaux réels, et à l'abus de confiance des clients. De plus, les neurotechnologies numériques qui visent à améliorer le « bien-être » sont susceptibles d'induire des modifications du comportement et nécessitent une surveillance pour prévenir les dérives et protéger les utilisateurs.

3.6. Questions d'éthique relatives à l'autonomie et à l'intégrité de la personne

Cette section concerne les effets potentiels des neurotechnologies numériques qui doivent être pris en considération indépendamment de la motivation de leur usage et qui peuvent concerner aussi bien les applications médicales que non-médicales.

3.6.1. Questions d'éthique liées à la perturbation de l'identité et de l'agentivité

Malgré le changement physiologique constant au niveau cellulaire, chaque être humain s'identifie subjectivement comme une personne unique, un « je » en continuité avec soi-même au cours d'une vie. Nous avons l'impression d'être capables de décider de nos actes et d'en être la cause – faculté appelée libre arbitre en philosophie. Cette notion a été niée par certains philosophes à l'instar de Spinoza¹³⁸ et questionnée par les neurosciences¹³⁹. La neurologie décrit des perturbations variées des différents processus de construction de l'identité humaine, résultant d'une grande diversité de lésions cérébrales¹⁴⁰. La psychiatrie fait de même dans des maladies pour lesquelles les zones précises de dysfonctionnement cérébral restent plus difficiles à localiser. Ces situations rencontrées en

¹³⁸ *L'Éthique*, IV

¹³⁹ Il est possible d'enregistrer des changements d'activité dans le cerveau de sujets humains avant qu'ils aient l'impression consciente de décider une action. La publication initiale (Libet B, Gleason CA, Wright EW, Pearl DK. Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain*. 1983, 106:623-42. doi:10.1093/brain/106.3.623) a eu une forte influence et a suscité de nombreuses réactions et discussions. Toutefois des travaux ultérieurs avec d'autres approches montrent aussi qu'une activité cérébrale peut être détectée avant la prise consciente d'une décision par le sujet (par exemple : Soon CS, Brass M, Heinze HJ, Haynes JD. Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nat Neurosci*. 2008, 11:543-5. doi:10.1038/nn.2112).

¹⁴⁰ Les conséquences sur la perception de soi et du monde entraînées par des lésions cérébrales localisées liées à des accidents vasculaires, des tumeurs ou à la neurochirurgie de l'épilepsie sont illustrées de manière facilement accessible aux lecteurs non spécialistes dans différents livres, par exemple, « L'homme qui prenait sa femme pour un chapeau » d'Oliver Sacks, « Le Fantôme intérieur » de Vilayanur S. Ramachandran et Sandra Blakeslee, « Le libre-arbitre et la science du cerveau » de Michael Gazzaniga, « Les vacances de Momo Sapiens » de Mathias Pessiglione.

médecine soulignent la vulnérabilité de la personne humaine aux altérations du fonctionnement cérébral. L'impression subjective de la personne d'être à l'origine de ses actes, habituellement ressentie et rapportée comme une certitude objective, est souvent désignée par « agentivité » (*agency*). Cette impression est au cœur de la notion d'autonomie humaine. Celle-ci peut être remise en question par les neurotechnologies (par exemple la neurostimulation) puisque la personne peut avoir l'impression qu'elle n'est plus, ou plus entièrement, à l'origine de ses actions. Au-delà de la perte de l'impression d'être à l'origine de ses actes, la personne pourrait aussi voir ses désirs ou ses intérêts modifiés, sans nécessairement être critique vis-à-vis de ces modifications, voire sans en être consciente. Une telle perte de contrôle pourrait par exemple résulter du recrutement ou du détournement, par la stimulation, des circuits de récompense, de manière analogue à la prise de drogue addictive, et aboutir à une dépendance (voir Annexe 1-4.2).

Les modifications de l'activité cérébrale effectuées dans un but thérapeutique cherchent en principe à éviter de telles perturbations, voire à les corriger si elles existent. Il n'en reste pas moins qu'un risque souvent mis en avant pour les dispositifs de stimulation cérébrale, est d'interférer directement avec ces caractéristiques essentielles de la personne humaine ou plus simplement d'ébranler la confiance des personnes dans leur unicité ou leur autonomie. Des exemples de commentaires de patients porteurs d'une stimulation cérébrale profonde illustrent ce point : « *Suis-je encore moi-même ? Comment les autres me perçoivent-ils (le même ou différent) ? Les réglages sont-ils réalisés par moi-même ou par d'autres ?* » ou encore « *Si les réglages modifient mon comportement par l'effacement des symptômes (plus de confort) mais aussi par leurs effets secondaires (moins de confort), d'autres peuvent-ils manipuler ces réglages ?* ». Il s'agit bien sûr de perceptions personnelles et subjectives, sans possibilité de généralisation statistique, qui peuvent évoluer sans causes objectives réelles, mais qui peuvent aussi être elles-mêmes perturbées par une action sur l'activité cérébrale. La compréhension des mécanismes neuronaux sous-jacents est actuellement insuffisante pour que l'on puisse avoir la certitude d'éviter leur perturbation avec les différents types de stimulations utilisés ou proposés. La détection, la correction et la prévention de telles perturbations de l'identité ou de l'agentivité nécessitent un suivi proactif des patients puisqu'elles sont difficiles à définir et que les patients ne souhaitent pas nécessairement en parler, en particulier aux médecins. Dans ce cadre, une étroite collaboration entre patients et thérapeutes est indispensable avec une écoute ouverte des patients et de leur entourage.

3.6.2. Questions d'éthique liées à la modification des comportements

Dans cette section nous examinons des questions liées à la modification des comportements et à l'apparition de dépendances ou de troubles de la décision (voir 3.2.1). Ces questions concernent aussi bien des modifications indésirées, induites par une neurotechnologie utilisée dans un autre but, que les modifications qui pourraient être recherchées avec un objectif de « normalisation ». Elles se posent aussi bien dans le cadre de l'utilisation médicale des neurotechnologies, en particulier des stimulations¹⁴¹, qu'en dehors du contexte médical. Dans ce dernier cas, l'absence de suivi médical rend particulièrement difficile la détection de ces modifications. De plus, l'utilisation de neurotechnologies chez de nombreuses personnes donnerait à de telles modifications une importance et une gravité. Les conséquences des usages des neurotechnologies sont encore peu documentées, et une réflexion

¹⁴¹ Des perturbations du comportement sont bien documentées dans le cadre de la stimulation cérébrale profonde pour des affections neurologiques, comme la maladie de Parkinson: Nassery A, Palmese CA, Sarva H, Groves M, Miravite J, Kopell BH. Psychiatric and Cognitive Effects of Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2016 16:87. doi:10.1007/s11910-016-0690-1 ; Pomes MV, D'Urso G, Bove I, Cavallo LM, Della Ragione L, Palmiero C, Perrotta F, Esposito F, Somma T. Psychiatric Outcomes of Subthalamic Nucleus Deep Brain Stimulation: A Systematic Review of Short- and Long-Term Effects. *Brain Sci.* 2025 15:566. doi:10.3390/brainsci15060566 ; Eliufoo E, Kamuyalo C, Yusheng T, Nyundo A, Yamin L. The safety profile of subthalamic nucleus and globus pallidus internus deep brain stimulation for Parkinson's diseases: A systematic review of perioperative complications and psychological impacts. *Langenbecks Arch Surg.* 2025 410:131. doi:10.1007/s00423-025-03674-z.

prospective est indispensable pour mettre en œuvre des mesures de prévention lorsque cela est justifié.

Modification des comportements, normes sociales et respect de l'autonomie

Les principes d'autonomie et de respect de la diversité doivent être mis en regard des normes sociales qui tendent à définir à chaque moment ce qui est « normal » et ce qui ne l'est pas. Ces normes évoluent dans le temps. Ainsi, un biais peut exister dans la conception même de l'interface cerveau-machine ou du dispositif de stimulation : quel trouble veut-on améliorer ? Dans certains cas, les personnes porteuses d'une différence qu'un regard extérieur perçoit comme un handicap, ne considèrent pas cette différence comme une anomalie à corriger¹⁴². Dans le domaine des manifestations neuropsychiatriques, on insiste actuellement sur la prudence nécessaire dans la caractérisation de différences comme des troubles. Pour en tenir compte, l'usage de termes comme « neurodivergent » et « neurotypique » est souvent proposé ou revendiqué par les patients au lieu de l'opposition entre « pathologique » et « normal ».

Par ailleurs, des dispositifs de modification de l'activité cérébrale pourraient être indûment proposés pour modifier des comportements pour lesquels la norme sociale joue un rôle majeur. Ainsi la psychochirurgie ou la stimulation cérébrale ont été utilisées pour « traiter » l'homosexualité¹⁴³. Si cela semble inacceptable aux yeux d'Européens contemporains, force est de constater les différences qui existent avec d'autres pays ou d'autres époques, ce qui appelle à une grande vigilance.

Il faut enfin mentionner la possibilité, en ce qui concerne les neurotechnologies comme dans d'autres domaines thérapeutiques, de conflits d'intérêts possibles dans la définition de la normalité. Cela peut se produire si les entités qui définissent les troubles qui doivent être améliorés, sont aussi celles qui bénéficient des retombées du progrès thérapeutique ou de la commercialisation des produits permettant cette amélioration. Plus le seuil d'indication est bas et la prescription fréquente, plus les bénéfices potentiels, y compris commerciaux, sont élevés¹⁴⁴. Cette tension éthique doit être prise en compte en gardant comme objectif unique l'intérêt des personnes concernées.

La frontière entre incitation « positive » (*nudging*), par exemple pour faire plus d'activité physique, influence et manipulation est floue. L'exploitation de données neurales, même issues de capteurs non-invasifs à l'usage du grand public, pourrait conduire à des formes de manipulation si ces informations étaient utilisées pour modifier le comportement des individus. La simple surveillance de l'attention, par exemple dans des environnements professionnels ou éducatifs, pourrait évoluer vers une régulation implicite des performances ou une standardisation des comportements cognitifs. Il faut souligner que les algorithmes de ciblage jouent un rôle clé dans l'orientation des utilisateurs et leur manipulation sans qu'ils en aient conscience. Dans des contextes commerciaux ou publicitaires, l'analyse de signaux cérébraux pourrait servir à cibler ou à calibrer les messages pour susciter les réponses émotionnelles recherchées ou des comportements d'achat (par exemple des publicités montrées à la personne en fonction de ses données neurales d'attention ou d'émotion). Un tel usage soulèverait d'importants enjeux éthiques liés au respect de la vie privée, à la liberté cognitive et à l'autonomie de jugement. Des utilisations dans des buts de manipulation dans d'autres contextes que

¹⁴² Ceci est illustré par le refus des implants cochléaires par certains patients ou parents d'enfants atteints de surdité, qui considèrent qu'être malentendant est une variante de la normale qui a permis le développement d'une culture autour de la langue des signes. Dans un autre contexte, certains patients atteints de syndrome d'enfermement (*locked-in syndrome*) expriment une réticence pour des interfaces cerveau-machine de synthèse vocale, ne voulant pas mettre en péril « le seul organe intact qui leur reste ».

¹⁴³ Isabelle Perreault, Chapitre 1 Psychochirurgie et homosexualité. Quelques cas à l'Hôpital Saint-Jean-de-Dieu   la mi-XX  siècle. in [La Régulations sociales des minorités sexuelles – L'inquiétude de la différence](#). P. Corriveau, V. Daoust ed., Presses de l'Université du Québec, 2011; O'Neal CM, Baker CM, Glenn CA, Conner AK, Sughrue ME. Dr. Robert G. Heath: a controversial figure in the history of deep brain stimulation. *Neurosurg Focus*. 2017 43:E12. doi:10.3171/2017.6.FOCUS17252.

¹⁴⁴ Cette pratique, d j dénoncée auparavant par d'autres auteurs, a été appelée *disease mongering* (parfois traduit par « façonnage de maladie ») en 1992 par Lynn Payer (*Disease-mongers: how doctors, drug companies, and insurers are making you feel sick*. New York: J. Wiley. ISBN 978-0471543855.)

commerciaux (politiques, idéologiques, sectaires, etc.) peuvent être envisagées et doivent être strictement interdites. Le Règlement européen sur l'intelligence artificielle (paragraphe 28 et 29) proscrie toute utilisation de systèmes d'intelligence artificielle pour influencer le comportement y compris de manière subliminale. Une restriction similaire doit être appliquée pour les interfaces cerveau-machine, qu'elles incluent ou non des techniques d'intelligence artificielle.

Recommandation (Modification des comportements)

- Réglementer et encadrer strictement la mise sur le marché des dispositifs de neurotechnologie numérique susceptibles d'influencer le comportement ou le jugement de la personne concernée, qu'ils incluent ou non des techniques d'intelligence artificielle.

Risques possibles d'« incorporation » des dispositifs s'ils sont utilisés pour manipuler des objets

Les interfaces cerveau-machine posent la question du franchissement des limites entre le contrôle par une personne de son corps et le contrôle d'une machine qui en est une extension (prothèse, fauteuil, robot d'assistance ou autre réponse d'un ordinateur¹⁴⁵). Ces technologies étant récentes et d'usage restreint, les données manquent pour en évaluer les conséquences. Toutefois, les connaissances acquises dans d'autres contextes ouvrent des pistes de réflexion. D'une part, l'utilisation répétée d'un outil complexe comme un instrument de musique entraîne des modifications plastiques cérébrales importantes¹⁴⁶. D'autre part, le cerveau peut être facilement dupé expérimentalement et des confusions entre le corps réel et tout ou partie d'un corps virtuel peuvent être induites, comme dans les illusions du membre fantôme touché¹⁴⁷, du nez allongé¹⁴⁸ ou de la main en caoutchouc¹⁴⁹. Ces exemples indiquent que la manipulation d'objets réels ou virtuels par l'intermédiaire d'une interface cerveau-machine pourrait présenter un risque de distorsion de la perception de soi, voire de modifications stables du schéma corporel en cas d'utilisation répétée. L'intériorisation subjective d'une neuroprothèse peut être un avantage pour une personne lourdement handicapée. En revanche, la manipulation d'objets par des personnes non déficientes (par exemple le déplacement d'un curseur sur un écran remplaçant une souris d'ordinateur ou la génération d'un texte sans clavier, voire de parole synthétique) doit être envisagée avec une grande prudence, *a fortiori* si la personne a simultanément l'impression d'évoluer dans un monde dit virtuel (réalité virtuelle, métavers)¹⁵⁰. De

¹⁴⁵ Cette réponse peut inclure non seulement la synthèse de parole mais aussi la mobilisation d'un avatar de visage. Les systèmes d'intelligence artificielle pourraient en principe permettre que la voix synthétique ou l'apparence du visage ressemble à celles du sujet. Voir par exemple Metzger SL, Littlejohn KT, Silva AB, Moses DA, Seaton MP, Wang R, Dougherty ME, Liu JR, Wu P, Berger MA, Zhuravleva I, Tu-Chan A, Ganguly K, Anumanchipalli GK, Chang EF. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control. *Nature*. 2023 620:1037-46. doi:10.1038/s41586-023-06443-4.

¹⁴⁶ Pascual-Leone A. The brain that plays music and is changed by it. *Ann N Y Acad Sci*. 2001 930:315-29. doi:10.1111/j.1749-6632.2001.tb05741.x.

¹⁴⁷ Des sujets amputés pour lesquels par un jeu de miroirs on superpose le membre valide avec l'emplacement du membre absent, ont l'impression de percevoir le membre absent. Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D, Cobb S. Touching the phantom limb. *Nature*. 1995 377:489-90. doi:10.1038/377489a0.

¹⁴⁸ L'illusion de Pinocchio est provoquée chez un sujet yeux bandés, qui se touche le bout du nez et chez lequel une vibration est appliquée au biceps faisant croire que le bras s'étend : le sujet a l'impression que son nez s'allonge car son cerveau tente de réconcilier le maintien du contact du doigt sur le nez avec l'extension du bras. Lackner JR. Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. *Brain*. 1988 111:281-97. doi:10.1093/brain/111.2.281.

¹⁴⁹ On place une main réaliste en caoutchouc en évidence devant des sujets alors qu'on cache leur propre main à leur vue. Après plusieurs stimulations de la main cachée avec un pinceau, les sujets ont l'impression de sentir ce contact au niveau de la main en caoutchouc. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. Botvinick M, Cohen J. *Nature*. 1998 391:756. doi:10.1038/35784. Cette expérience a été reproduite avec de nombreuses variantes créant des illusions complexes de propriété du corps. Yong E. Out-of-body experience: Master of illusion. *News feature*. *Nature*. 2011 480:168-70.

¹⁵⁰ Les recommandations de l'UNESCO sont explicites à cet égard : « Les États membres devraient se pencher sur les questions éthiques profondes relatives à l'autodétermination, au consentement, à la vie privée et au risque de manipulation soulevées par les neurotechnologies dans le contexte des systèmes de recommandation, de l'amorçage et de l'incitation, du marketing du sommeil et du rêve, du neuromarketing et des environnements en boucle fermée, en adoptant des politiques et des réglementations globales [...] sur la conception

tels usages pourraient aussi induire des sensations « d’amputation » et une souffrance en cas d’arrêt de fonctionnement de l’interface cerveau-machine (panne, changement de modèle, arrêt de commercialisation, etc.). Outre les effets négatifs pour les individus, cela constituerait une pression pour poursuivre l'utilisation du dispositif d'interface cerveau-machine, la personne perdant ainsi son autonomie au profit du fournisseur du dispositif, qui tirerait un avantage commercial de la dépendance des clients. Une très grande prudence doit donc être recommandée vis-à-vis de tels développements et des travaux de recherche sont nécessaires pour en évaluer les risques réels et les comparer aux bénéfices très hypothétiques mis en avant par les entreprises dont l'objectif annoncé est de simplifier « l'interaction homme-machine ».

Recommandation (Risques d'« incorporation » des dispositifs)

- Pour chaque type de neurotechnologie numérique susceptible d'être mis sur le marché, déterminer les conséquences de la privation du dispositif en particulier après usage prolongé.

Perception des interfaces cerveau-machine et possibilités de pressions sociales

Dans un cadre médical, les entretiens avec les médecins comme avec les patients révèlent qu'il peut exister chez ces derniers de forts préjugés aussi bien négatifs que positifs vis-à-vis des neurotechnologies. Certains sont très réticents à l'idée de l'implantation d'un dispositif de « contrôle » dans le cerveau. Des patients implantés ont d'ailleurs mentionné l'impression de perte de contrôle sur leur corps ou le risque de stigmatisation lié à l'implantation de dispositifs visibles. D'autres personnes sont, à l'inverse, très demandeuses de bénéficier d'innovations technologiques dont elles attendent beaucoup, parfois plus enclines que les soignants à « prendre des risques » pour améliorer leur situation. Il est donc important que les propositions thérapeutiques répondent autant que possible aux attentes des patients, sans promesse infondée ni occultation des risques et des limites.

Hors cadre médical, les dispositifs de neurotechnologies numériques pourraient être perçus comme nécessaires à la performance ou au bien-être. En outre, la généralisation éventuelle de ces usages pourrait accentuer des formes de pression sociale : dans certains environnements, professionnels ou non, les interfaces cerveau-machine pourraient devenir des outils attendus pour « optimiser » les capacités, engendrant des inégalités, voire des phénomènes de discrimination ou d'exclusion, entre ceux qui y accèdent et ceux qui les refusent ou ne les tolèrent pas. Il faut souligner que des effets de mode peuvent suffire à engendrer de fortes pressions sociales même si l'efficacité réelle des technologies est faible ou nulle. La possible banalisation des neurotechnologies numériques appelle à une vigilance impliquant chercheurs, décideurs publics, utilisateurs, et la société dans son ensemble.

3.7. Cas particulier du cerveau en développement : les enfants et les adolescents

Comme le souligne la recommandation de l'UNESCO¹⁵¹, un enjeu éthique majeur est de préserver l'intérêt de l'enfant et de protéger les générations futures. Le développement du cerveau humain se poursuit longtemps après la naissance et ne se termine progressivement que chez le jeune adulte¹⁵². Durant toute cette période, le système nerveux est particulièrement sensible aux

et l'utilisation des environnements en boucle fermée – tels que les systèmes informatiques immersifs qui ajustent les expériences en fonction des données biométriques neurales et cognitives détectées. »

¹⁵¹ Recommandation sur l'éthique des Neurotechnologies, adoptée à la Conférence Générale de l'UNESCO le 12 Novembre 2025.

¹⁵² Somerville LH. Searching for Signatures of Brain Maturity: What Are We Searching For? *Neuron*. 2016 92:1164-7.

doi:10.1016/j.neuron.2016.10.059 ; Tamnes CK, Ostby Y, Fjell AM, Westlye LT, Due-Tønnessen P, Walhovd KB. Brain maturation in adolescence and young adulthood: regional age-related changes in cortical thickness and white matter volume and microstructure. *Cereb Cortex*. 2010 20:534-48. doi:10.1093/cercor/bhp118.

interférences et les conséquences d'interventions directes sont susceptibles d'être définitives¹⁵³. Ces considérations amènent à porter une attention toute particulière à l'usage des neurotechnologies chez les enfants et les adolescents.

Utilisation de neurotechnologies dans le cadre éducatif

L'utilisation de neurotechnologies dans l'éducation des enfants, en particulier en contexte scolaire, doit susciter de grandes réserves selon le rapport pour le Comité d'éthique de l'INSERM¹⁵⁴. La mise en place de dispositifs ayant pour but la surveillance de l'attention¹⁵⁵, ou tout autre paramètre d'activité cérébrale, poserait des problèmes de contrainte psychologique, d'équité, et de liberté de l'enfant.

L'utilisation de dispositifs de suivi d'attention a été proposée pour faciliter l'apprentissage et en adapter le rythme et l'intensité aux caractéristiques de chacun¹⁵⁶. L'usage de neurotechnologies pour les enfants souffrant de troubles du neurodéveloppement (par exemple, certains troubles « dys »¹⁵⁷ ou de l'attention) a également été envisagé¹⁵⁸. Si de telles approches faisaient la preuve de leur efficacité et étaient validées médicalement dans le contexte de troubles du neurodéveloppement, leur utilisation nécessiterait alors une prescription et un suivi médical. Il faut toutefois souligner, comme le fait le rapport pour le Comité d'éthique de l'INSERM¹⁵⁹, que les résultats sont jusqu'à présent décevants et les études le plus souvent de qualité insuffisante.

Par ailleurs, des neurotechnologies à visée modulatrice ont été envisagées dans le but de renforcer la mémoire ou l'attention en l'absence de trouble particulier, aussi bien chez l'enfant que chez l'adulte ou les personnes âgées¹⁶⁰. Cependant, les effets sont au mieux minimes et surtout beaucoup d'études dans ce domaine souffrent d'insuffisances méthodologiques, ce qui rend leurs conclusions incertaines¹⁶¹. Par ailleurs, les conséquences directes et indirectes de telles stimulations et de leur répétition ne sont pas connues, et tout particulièrement chez les enfants et les adolescents. Une extrême prudence est nécessaire dans ce domaine car la modification de l'activité du cerveau en développement et ses conséquences à long terme sont imprévisibles, même si des effets apparemment « positifs » à court terme étaient démontrés de manière scientifiquement

¹⁵³ Kolb B, Harker A, Gibb R. Principles of plasticity in the developing brain. *Dev Med Child Neurol*. 2017 59:1218-23. doi:10.1111/dmcn.13546.

¹⁵⁴ Catherine Vidal. [La convergence des neurotechnologies et du numérique dans l'éducation : Enjeux éthiques et sociétaux](#). pp.1-35. Note pour le Comité d'éthique de l'INSERM, 2024.

¹⁵⁵ La surveillance de l'attention ou de la vigilance des élèves a été transitoirement utilisée en Chine, ce qui a suscité de fortes réserves et l'arrêt des expérimentations – DisinfoCheck, Grégoire Ryckmans - [La Chine utilise-t-elle l'intelligence artificielle pour « contrôler » le cerveau des élèves ?](#), 2023

¹⁵⁶ Zeng H, Huang X, Liu Y, Gu X. Exploring Neural Evidence of Attention in Classroom Environments: A Scoping Review. *Brain Sci*. 2025 15:860. doi:10.3390/brainsci15080860.

¹⁵⁷ Difficultés à comprendre ou à produire la parole ou le langage, à écrire ou à acquérir d'autres apprentissages spécifiques.

¹⁵⁸ Liang X, Wei X, Huang Y, Li J, Feng H, Fan J, Zhang L, Wang Z, Zhao X, Pan W, Liu R. Comparative efficacy of non-invasive brain stimulation for attention-deficit/hyperactivity disorder: a systematic review and network meta-analysis. *Front Neurol*. 2025 16:1650154. doi:10.3389/fneur.2025.1650154 ; Conelea CA, Lieske A. Neurodevelopmental considerations for transcranial magnetic stimulation trials in youth. *Neuropsychopharmacology*. 2026 51:219-29. doi:10.1038/s41386-025-02225-w ; Nejati V, Ghafuri F, Hosseini K, Behroozmand R. The effectiveness of transcranial electrical stimulation in individuals with specific learning disorder (SLD): systematic review and transfer analysis. *J Neurodev Disord*. 2025 17:66. doi:10.1186/s11689-025-09623-7.

¹⁵⁹ Catherine Vidal. [La convergence des neurotechnologies et du numérique dans l'éducation : Enjeux éthiques et sociétaux](#). pp.1-35. Note pour le Comité d'éthique de l'INSERM, 2024.

¹⁶⁰ Malkani RG, Zee PC. Brain Stimulation for Improving Sleep and Memory. *Sleep Med Clin*. 2022 17:505-21.

doi:10.1016/j.jsmc.2022.06.013 ; Ben Izhak S, Jacoby N, Diedrich L, Antal A, Lavidor M. Enhanced cognitive performance in older adults through combined cognitive training and transcranial direct current stimulation. *Sci Rep*. 2025 15:24114. doi:10.1038/s41598-025-08322-6. Ben Izhak S, Lavidor M [The Handbook of Noninvasive Transcranial Brain Stimulation in the Cognitive Domain](#). 2025. Elsevier Inc. ; Sandrini M, Manenti R, Gobbi E, Pagnoni I, Geviti A, Alaimo C, Campana E, Binetti G, Cotelli M. Cognitive reserve predicts episodic memory enhancement induced by transcranial direct current stimulation in healthy older adults. *Sci Rep*. 2024 14:4879. doi:10.1038/s41598-024-53507-0.

¹⁶¹ Nejati V, Vaziri Z, Antal A, Antonenko D, Behroozmand R, Bestmann S, Brunelin J, Brunoni AR, Carvalho S, Davis NJ, Enticott PG, Fallgatter AJ, Ferrucci R, Fitzgerald PB, Hamada M, Hamilton RH, Hoy KE, Jaberzadeh S, Jamil A, Cohen Kadosh R, Krekelberg B, Laureys S, Romero Lauro LJ, Loo CK, Martin D, Martinotti G, Mondino M, Oliviero A, Pellicciari MC, Plewnia C, Pobric G, De Raedt R, Razza LB, Rocchi L, Salehinejad MA, Khorrani AS, Schecklmann M, Siebner HR, Taylor SF, Vanderhasselt MA, Vanneste S, Vicario CM, Woods AJ, Ziemann U, Nitsche MA. Report Approval for Transcranial Electrical Stimulation (RATES): expert recommendation based on a Delphi consensus study. *Nat Protoc*. 2025. doi:10.1038/s41596-025-01259-0.

convaincante. Une interdiction de telles méthodes chez les enfants et les adolescents est donc nécessaire (en dehors dans le futur, d'indications médicales éventuelles, basées sur des preuves d'efficacité et d'innocuité). Il faut attirer à ce sujet l'attention sur les dangers potentiels de dispositifs de stimulation vendus sur internet, sans contrôle, et qui font croire à des bénéfices supposés mais non démontrés, sans aucune évaluation des risques.

Usages en recherche pédagogique

Il faut distinguer l'utilisation de neurotechnologies pour la recherche sur la pédagogie, afin de mieux comprendre les processus d'apprentissage et d'aider à optimiser les méthodes d'enseignement, et leur mise en œuvre éventuelle, hors d'un cadre de recherche, dans les activités scolaires en général. La question de l'expérimentation pédagogique ne concernant pas les neurotechnologies a été abordée dans l'avis 131 du CCNE¹⁶². L'utilisation de neurotechnologies numériques non-invasives dans un contexte de recherche dûment contrôlé et autorisé pourrait être envisagée, en tenant compte des règles applicables aux études chez l'enfant, en particulier concernant le consentement.

Usages en dehors du contexte scolaire

L'usage de neurotechnologies numériques dans le contexte de jeux vidéo ou d'autres activités de loisir suscite des questions particulières chez les enfants et les adolescents. Il convient d'anticiper les effets de ces dispositifs sur la santé physique et psychologique des jeunes, sans attendre de les constater, avec retard, comme cela a été le cas pour les smartphones, les réseaux sociaux ou les systèmes d'intelligence artificielle générative, et de mettre en place des mesures de contrôle appropriées. Il faut souligner qu'aucune donnée ne permet actuellement de fixer une limite d'âge au-dessus de laquelle les risques seraient plus faibles, sachant que le développement cérébral est un processus long sans étape finale clairement identifiée. La prudence incite donc, en l'absence de données expérimentales fiables, à appliquer des restrictions d'usage aux mineurs.

Recommandation (Usages chez les enfants et les adolescents)

- En dehors de la recherche ou d'indications médicales, interdire l'utilisation des neurotechnologies numériques chez les enfants et adolescents, y compris dans le cadre éducatif et les loisirs.

3.8. Neurotechnologies numériques et droit

3.8.1. Questions liées à la discrimination et à la responsabilité en droit

Du fait de l'évolution des techniques de mesure et surtout de la puissance de leur analyse à l'aide des méthodes d'apprentissage automatique, il devient progressivement possible d'obtenir des informations de plus en plus précises sur l'activité cérébrale à partir d'enregistrements simplifiés d'activité électrique par exemple, qui sont susceptibles d'être utilisées dans des pratiques discriminatoires. Cependant l'article 225-1 du Code pénal qui définit les motifs discriminatoires ne mentionne actuellement pas les données neurales. D'autre part, l'article 225-3 du Code pénal fait référence aux données neurales recueillies par les « techniques d'imagerie cérébrale », alors que ce terme ne couvre pas nécessairement tous les procédés de mesure de l'activité cérébrale. De façon à assurer correctement la protection des citoyens contre les usages abusifs des neurotechnologies numériques et d'éviter des débats ou des contentieux concernant la terminologie, il serait opportun que le législateur porte son attention sur ces points.

¹⁶² Avis n°131 du CCNE « [Cadre éthique de l'expérimentation pédagogique en situation réelle](#) », 2019.

Recommandations (Neurotechnologies numériques et droit)

- Inclure les données neurales dans les motifs de discrimination, au sens de l'article 225-1 du Code pénal, que ces données soient en rapport ou non avec l'état de santé.
- Remplacer la phrase de l'article 225-3 du Code pénal : « ou de données issues de techniques d'imagerie cérébrale » par « ou de données issues de techniques d'imagerie cérébrale et autres techniques de mesure de l'activité cérébrale ».

Les perturbations théoriquement possibles de l'identité et de l'agentivité évoquées plus haut sont susceptibles d'être évoquées dans un cadre judiciaire si une personne porteuse d'une interface cerveau-machine ou de neurostimulation est impliquée dans des actes délictueux ou criminels. L'accusé porteur d'un dispositif de stimulation était-il responsable au moment des faits qui lui sont reprochés ? Si la perturbation est permanente peut-elle être identifiée par les experts ? Qu'en est-il de troubles transitoires ? Dans ce contexte il faut souligner la complexité apportée par les dispositifs en boucle fermée dans lesquels la stimulation est déclenchée en réponse à l'analyse de signaux cérébraux captés par l'interface cerveau-machine. Les signaux déclencheurs, les détails de leur analyse et les réponses engendrées chez le patient sont difficiles à enregistrer, à analyser et surtout à reproduire pour évaluer leurs conséquences comportementales. Le rôle du dispositif dans une conduite délictueuse éventuelle serait particulièrement difficile à évaluer.

Inversement, la question de l'utilisation de stimulation cérébrale pour la prévention de récidives de troubles du comportement et de leurs conséquences criminelles (violences, meurtre, crime sexuel...) pourrait se poser. L'efficacité et les risques des stimulations cérébrales dans ce but ne sont pas connus mais il est vraisemblable que leur exploration ira en augmentant. Si les neurotechnologies étaient susceptibles de remplacer ou de venir en complément des traitements médicaux actuellement mis en œuvre dans ce contexte, leur utilisation relèverait de l'injonction de soin prononcée par le juge sur la base d'expertises médicales. À l'instar des traitements pharmacologiques inhibiteurs de libido, la mise en œuvre de stimulation cérébrale dans ce cadre devrait être prévue par la loi. Une telle évolution ne pourrait toutefois pas s'envisager sans une réflexion préalable sur les questions éthiques précédemment évoquées relatives à l'autonomie et à l'intégrité de la personne et sur les fondements du droit pénal.

3.8.2. Faut-il reconnaître de nouveaux droits relatifs au système nerveux ?

Les avancées rapides des neurotechnologies soulèvent des interrogations quant à la capacité des droits humains¹⁶³ actuels à protéger l'intégrité mentale des individus. Ceci a fait naître chez certains auteurs¹⁶⁴ l'idée de créer de nouveaux droits spécifiques, parfois qualifiés de « neurodroits »¹⁶⁵. Cette suggestion a suscité un intérêt dans plusieurs pays mais aussi des réticences¹⁶⁶ concernant un risque de frein au progrès médical ou d'affaiblissement des protections

¹⁶³ Ces droits sont définis par des textes comme la *Déclaration universelle des droits de l'homme et du citoyen* de 1789 mentionnée dans la Constitution, la *Déclaration universelle des droits de l'homme* de 1948, le *Pacte international relatif aux droits civils et politiques*, la *Convention Européenne de sauvegarde des Droits de l'Homme et des Libertés fondamentales*, la *Charte des droits fondamentaux de l'Union européenne*, et sont l'objet d'une riche jurisprudence concernant leur application.

¹⁶⁴ Ienca M, Andorno R. Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology. *Life Sci Soc Policy*. 2017 13:5. doi:10.1186/s40504-017-0050-1 ; Yuste R, Goering S, Arcas BAY, Bi G, Carmena JM, Carter A, Fins JJ, Friesen P, Gallant J, Huggins JE, Illes J, Kellmeyer P, Klein E, Marblestone A, Mitchell C, Parens E, Pham M, Rubel A, Sadato N, Sullivan LS, Teicher M, Wasserman D, Wexler A, Whittaker M, Wolpaw J. Four ethical priorities for neurotechnologies and AI. *Nature*. 2017 551:159-63. doi:10.1038/551159a.

¹⁶⁵ Le terme « neuro-droit », traduction de *Neural Law*, fait référence aux études visant à tirer parti des avancées des neurosciences dans le domaine du droit ne doit pas être confondu avec les « neurodroits » (traduction de *neural rights*) qui fait référence à des droits qu'il faudrait définir et mettre en place du fait de la nouveauté des possibilités ouvertes par les neurotechnologies de lire ou de modifier l'activité cérébrale.

¹⁶⁶ Par exemple: Gilbert F, Russo I. Neurorights: The Land of Speculative Ethics and Alarming Claims? *AJOB Neurosci*. 2024 15:113-5. doi:10.1080/21507740.2024.2328244 ; Ruiz S, Valera L, Ramos P, Sitaram R. Neurorights in the Constitution: from neurotechnology to ethics and politics. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2024 379:20230098. doi:10.1098/rstb.2023.0098.

juridiques existantes. Il reste que l'évolution du contexte sociotechnique et l'émergence de risques spécifiques aux neurotechnologies numériques invitent à interroger la pertinence de cette position. Il s'agit donc d'examiner de manière nuancée la nature des menaces et les protections réellement nécessaires en termes de droit. L'enjeu est de renforcer la protection de l'intégrité mentale sans affaiblir le corpus historique des droits humains, ni restreindre la recherche scientifique ou les innovations médicales. C'est un sujet dans lequel la confrontation d'expertises diverses est nécessaire, impliquant notamment des scientifiques et des médecins auprès des spécialistes du droit, ainsi que des experts des sciences humaines et sociales et des représentants de la société civile. La réflexion collective doit s'engager autour d'un objectif commun : garantir que les avancées neurotechnologiques se développent dans un cadre respectueux de la dignité, de la liberté et de l'autonomie de la personne humaine en mobilisant à la fois le corpus juridique existant et, le cas échéant, de nouveaux outils, si ceux-ci se révélaient indispensables.

4. Conclusions

Dans toutes les réflexions sur les neurotechnologies numériques, il est essentiel de tenir compte du fait que le cerveau est l'organe qui permet la pensée, la vie psychique et tout ce qui constitue la personne humaine. Ainsi la médecine nous a appris que les dysfonctionnements du cerveau peuvent perturber les multiples facettes de ce qui est au cœur de ce que nous sommes. Lorsque les neurotechnologies numériques permettent de remédier à ces dysfonctionnements, elles doivent clairement être encouragées et soutenues. En revanche la plus grande prudence doit entourer les autres applications qui ont pour but le « bien-être » ou l'augmentation hypothétique des performances, dont les conséquences directes et indirectes sur le fonctionnement cérébral sont encore largement inconnues.

Pour certaines personnes souffrant de troubles neurologiques ou psychiatriques, ou en situation de handicap, pour lesquelles peu de moyens d'amélioration étaient disponibles, ces technologies commencent à offrir des possibilités nouvelles de traitement symptomatique ou palliatif. Si les neurotechnologies ne permettent pas, à ce jour, de supprimer, ni de ralentir, les processus pathologiques qui touchent le système nerveux, elles peuvent cependant en corriger certaines conséquences ou compenser certains déficits. Les recherches et les développements innovants, ainsi que l'évaluation rigoureuse des traitements, doivent être encouragés.

La diffusion possible des neurotechnologies numériques vers un plus large public, en dehors de toute indication médicale ou de situation de handicap avéré, soulève des interrogations sur leur efficacité, sur leur intérêt pour les utilisateurs et sur les conséquences de la généralisation éventuelle de leur utilisation. Les risques pour les personnes comme pour les structures sociales sont difficiles à évaluer. Les effets multiples mais non anticipés, générés par l'utilisation massive, largement incontrôlée, des technologies numériques grand public, comme par exemple les réseaux sociaux ou l'intelligence artificielle générative, dont le contrôle est le plus souvent situé hors d'Europe, ont été longtemps méconnus ou négligés. Cette erreur ne doit pas se reproduire pour les neurotechnologies numériques, intimement liées aux précédentes.

Les questions d'éthique concernent particulièrement la collecte et la gestion des données neurales, dont le caractère personnel et sensible doit être affirmé. L'utilisation large par le public des technologies numériques permet déjà la collecte, le traitement, et l'exploitation par un petit nombre de sociétés commerciales internationales d'une quantité considérable de données à caractère personnel modifiant d'une manière historiquement inédite les limites de la vie privée. Ces données sont traitées et utilisées dans des buts commerciaux, et potentiellement aussi de contrôle ou de manipulation, dans des logiques de surveillance ou d'influence. La puissance et le développement des

systemes d'intelligence artificielle exacerbe les tensions et les risques. La collecte directe de données neurales, porteuses d'informations hors du contrôle des personnes concernées, ne pourrait qu'élargir l'emprise des acteurs y ayant accès, sur les individus et leurs interactions sociales si des limites strictes de protection ne sont pas rapidement établies. Il en est de même de l'utilisation éventuelle de neurotechnologies numériques pour tenter de prédire le comportement des personnes, par exemple lors des embauches ou dans le domaine pénal, une vision qui porte en germe la négation du principe d'autonomie. Les usages potentiels dans des contextes professionnels ou éducatifs doivent être envisagées avec une extrême prudence et prendre en compte les effets indirects aussi bien sur les personnes elles-mêmes que sur leurs relations avec les autres et avec l'organisation au sein de laquelle elles évoluent.

La possibilité de modifier l'activité cérébrale, même si elle paraît actuellement très limitée en dehors des applications médicales, soulève des questions majeures sur le respect de l'autonomie, de l'intégrité et de l'agentivité des personnes, composantes essentielles de la dignité humaine. La plasticité et la fragilité considérables du système nerveux en développement doivent conduire à protéger tout particulièrement les sujets jeunes, enfants ou adolescents, des effets délétères potentiels, directs ou indirects, à court ou à long terme, des neurotechnologies numériques. Les risques éventuels sont d'autant plus difficiles à estimer que les neurotechnologies sont en développement, poussées par les avancées rapides du numérique. Bien que les neurotechnologies hors contexte médical soient souvent présentées comme ludiques et inoffensives, leur banalisation potentielle appelle à une vigilance impliquant chercheurs, décideurs publics, utilisateurs, et la société dans son ensemble. Une réévaluation régulière des dimensions éthiques des neurotechnologies numériques, tenant compte des évolutions technologiques, des meilleures connaissances scientifiques et médicales, et des attentes sociétales, est indispensable.

Glossaire

N.B. : les définitions des mots et expressions concernent uniquement le cadre de cet avis.

Agentivité : néologisme forgé à partir de l'anglais *agency*. En psychologie, l'agentivité désigne le sentiment d'être à l'origine de ses actions (le sens est variable selon les champs disciplinaires).

Anonymisation : traitement qui, appliqué à des données à caractère personnel, consiste à utiliser un ensemble de techniques de manière à rendre impossible, en pratique, toute identification de la personne concernée par quelque moyen que ce soit et de manière irréversible.¹⁶⁷ Une donnée anonymisée n'est plus une donnée à caractère personnel. En pratique, l'anonymisation de données à caractère personnel est quasiment impossible sans perte importante d'informations.

Apprentissage automatique (ou apprentissage machine, apprentissage statistique) : construction de modèles statistiques en corrélant des éléments extraits de très grandes quantités de données relatives à un domaine donné. Le processus d'entraînement ou d'apprentissage est fondé sur une optimisation itérative des valeurs des poids synaptiques de réseaux de neurones formels, l'objectif étant de classer les éléments contenus dans les données en catégories différentes en fonction de leurs similarités. Le résultat de ce processus est un modèle statistique des données qui est ensuite exploité pour identifier à quelles classes de similarité appartiennent de nouvelles données (modèles *prédictifs*) ou pour produire, à partir d'une requête, des réponses probables selon la corrélation de celle-ci avec les distributions statistiques du modèle (modèles *génératifs*).¹⁶⁸

Comité de protection des personnes (CPP) : comité d'éthique mis en place en France pour évaluer des projets de recherche réalisés et organisés sur des personnes en vue de développer les connaissances biologiques ou médicales¹⁶⁹, dans le cadre du Code de la santé publique¹⁷⁰.

Donnée biométrique : caractéristique physique ou biologique permettant d'identifier une personne (ADN, contour de la main, empreintes digitales...)¹⁷¹.

Donnée de santé : les données de santé sont des données à caractère personnel relatives à la santé physique ou mentale, passée, présente ou future, d'une personne physique [...] qui révèlent des informations sur l'état de santé de cette personne.¹⁷²

Données neurales (ou **neurodonnées** de l'anglais *neural data*) : données qualitatives et quantitatives concernant la structure, l'activité et la fonction du système nerveux, recueillies grâce aux neurotechnologies. Il s'agit des mesures ou observations les plus directes des états du système nerveux, états dont plusieurs sont corrélés à des états mentaux¹⁷³. Les **données cérébrales** (terme souvent utilisé dans le même sens) sont les données neurales concernant spécifiquement le cerveau et qui excluent les autres parties du système nerveux. Le terme **données neuronales** est aussi utilisé pour désigner spécifiquement ce qui concerne les neurones, sans tenir compte des autres cellules du système nerveux (cellules gliales et vaisseaux sanguins) qui contribuent à certaines des données recueillies ; le terme **neural**, qui fait référence à l'ensemble du tissu nerveux des différents organes qui composent le système nerveux, les inclut habituellement. Ces différents termes sont souvent employés de manière interchangeable, sans beaucoup de rigueur.

Données à caractère personnel sensibles : les données sensibles forment une catégorie particulière des données à caractère personnel. Elles comprennent les données qui révèlent la prétendue origine

¹⁶⁷ <https://www.cnil.fr/fr/technologies/lanonymisation-de-donnees-personnelles>

¹⁶⁸ D'après : Raja Chatila, Claude Kirchner, Sylvain Petitjean, Catherine Tessier - Chapitre 5 « L'intelligence artificielle : quels enjeux éthiques pour la recherche ? » In : *L'éthique de la recherche*, Quae, à paraître 2026.

¹⁶⁹ [Guide à destination des nouveaux membres des Comités de protection des personnes](#), 2024.

¹⁷⁰ [Code de la santé publique, Article L1121-4](#)

¹⁷¹ <https://www.cnil.fr/fr/definition/donnee-biometrique>

¹⁷² <https://www.cnil.fr/fr/quest-ce-que-donnee-de-sante>

¹⁷³ Recommandation sur l'éthique des Neurotechnologies, adoptée à la Conférence Générale de l'UNESCO le 12 Novembre 2025.

raciale ou l'origine ethnique, les opinions politiques, les convictions religieuses ou philosophiques ou l'appartenance syndicale ; les données génétiques, les données biométriques aux fins d'identifier une personne physique de manière unique, les données concernant la santé ou les données concernant la vie sexuelle ou l'orientation sexuelle d'une personne physique¹⁷⁴.

Dystonie : trouble du mouvement caractérisé par des mouvements et/ou des postures anormales, soutenus ou intermittents. Les mouvements et postures dystoniques sont généralement structurés et répétitifs, et peuvent être tremblants ou saccadés. Ils sont souvent initiés ou aggravés par une action volontaire et fréquemment associés à des mouvements de débordement¹⁷⁵. Les dystonies peuvent être observées dans différentes affections neurologiques ou isolées. Certaines formes débutent chez l'enfant et il existe des dystonies d'origine génétique.

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

Électrode : extrémité d'un conducteur électrique libérant ou captant un courant électrique, utilisée pour établir un contact avec une partie non métallique d'un circuit. Dans le cadre des neurotechnologies, les électrodes sont de types et de matériaux divers et sont placées au contact de la peau (voir électroencéphalogramme) ou à la surface ou à l'intérieur du cerveau.

Imagerie cérébrale (ou neuroimagerie) : La **neuroimagerie structurelle** fournit des informations statiques sur la forme et la structure du cerveau ; elle fait appel à l'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui utilise un champ magnétique élevé ou à la tomographie par émission de positons (TEP) qui utilise les rayons X. La **neuroimagerie fonctionnelle** donne des informations dynamiques sur l'activité cérébrale. Certaines méthodes comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ou l'imagerie spectroscopique en proche infrarouge (en anglais *near infrared spectroscopy*, NIRS) mesurent les variations de flux sanguin qui augmente dans les régions activées. La tomographie par émission de positons (TEP) mesure la distribution d'un traceur radioactif préalablement injecté par voie veineuse. D'autres méthodes détectent directement les variations de champ magnétique (magnétoencéphalographie, MEG) ou électrique (électroencéphalographie, EEG) directement liées à l'activité des neurones. Les limites du terme imagerie cérébrale sont mal définies et arbitraires : par exemple, parler d'imagerie lorsque les mesures concernent des données de type EEG recueillies avec un petit nombre d'électrodes sans grande précision sur la localisation de l'activité enregistrée peut être discutable.

Intelligence artificielle (IA) : domaine de recherche dont l'objectif est de concevoir des programmes informatiques qui simulent l'intelligence ou les capacités cognitives humaines à certains degrés. Les algorithmes issus de ce domaine de recherche sont mis en œuvre dans des *systèmes d'intelligence artificielle*, utilisés en vue de telle ou telle application comme la reconnaissance faciale, le diagnostic médical ou la production de textes. Le règlement européen 2024/1689 sur l'intelligence artificielle (*AI Act*) traite du cadre légal du développement et de la mise sur le marché de tels systèmes. On constate que l'expression « intelligence artificielle » est également utilisée, depuis quelques années, comme synonyme de « système à base d'apprentissage automatique » ou encore de « système d'intelligence artificielle générative », voire au-delà pour qualifier tous les systèmes numériques.¹⁷⁶

Interface cerveau-machine (ICM) ou brain-computer interface (BCI) : terme générique désignant un système de liaison directe entre un cerveau et un ordinateur. L'interface est habituellement formée d'une ou plusieurs électrodes qui captent un signal transmis à l'ordinateur qui l'interprète et déclenche une réponse. Ce dispositif permet à un individu d'effectuer des tâches sans passer par l'action des nerfs périphériques et des muscles. Ce terme peut désigner également des dispositifs qui permettent la

¹⁷⁴ [Règlement général pour la protection des données, article 9](#) et Loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, [Article 6](#)

¹⁷⁵ Traduit de Albanese A, Bhatia KP, Fung VSC, Hallett M, Jankovic J, Klein C, Krauss JK, Lang AE, Mink JW, Pandey S, Teller JK, Tijssen MAJ, Vidailhet M, Jinnah HA. Definition and Classification of Dystonia. *Mov Disord.* 2025 40:1248-59. doi:10.1002/mds.30220.

¹⁷⁶ D'après : Raja Chatila, Claude Kirchner, Sylvain Petitjean, Catherine Tessier - Chapitre 5 « L'intelligence artificielle : quels enjeux éthiques pour la recherche ? » In : *L'éthique de la recherche*, Quae, à paraître 2025.

transmission au cerveau d'un signal venant de l'ordinateur (ou d'un appareil numérique de petite taille) pour fournir une information (prothèse sensorielle) ou modifier son activité (par exemple stimulation cérébrale profonde).

Invasif, invasif *a minima*, non-invasif : dans le domaine des neurotechnologies un dispositif **invasif** comporte au moins un composant qui pénètre à l'intérieur du corps en franchissant la barrière cutanée (ou dans certains cas la paroi de l'œil ou une muqueuse). En particulier, les dispositifs intracrâniens sont situés à l'intérieur de la table interne de la voûte du crâne, soit à la surface du cerveau, soit à l'intérieur de celui-ci. Certains dispositifs sont parfois dits à **caractère invasif minimal** (*minimally invasive*) si les composants sont pénétrants, mais pas plus profondément que la table crânienne interne (dispositif encastré *embedded*) ou sont introduits par une veine.¹⁷⁷

Les composants d'un dispositif **non-invasif** ne pénètrent pas dans le corps (ils restent à l'extérieur de la peau). Il existe des appareils qui utilisent des rayons gamma ou des ultrasons susceptibles de créer des lésions à l'intérieur du cerveau sans ouverture de la peau (voir *Lésion intracérébrale*) qui sont à l'évidence « invasifs ». Le Règlement européen sur les dispositifs médicaux¹⁷⁸ rapproche des dispositifs invasifs les appareils capables de modifier l'activité cérébrale à l'aide de champs magnétiques ou de courants électriques sans ouverture chirurgicale de la peau. Ces dispositifs sont, en effet, capables de modifier l'activité du tissu nerveux, ce qui est une action invasive au sein du tissu cérébral.

Lésion intra-cérébrale : lésion qui résulte de la destruction ou de l'ablation d'un fragment de tissu cérébral. En neurochirurgie, ces lésions peuvent être effectuées à l'aide d'une électrode placée à l'endroit souhaité par stéréotaxie et délivrant un fort courant électrique localisé, ou par ablation mécanique d'un fragment de tissu. Certaines techniques récentes permettent de réaliser des lésions intracérébrales sans incision de la peau. Ces techniques sont guidées par l'imagerie cérébrale et utilisent un faisceau de rayons gamma (*gamma-knife*) ou des ultrasons focalisés guidés par IRM (*magnetic resonance-guided focalized ultrasounds MRgFUS*).

Maladie de Parkinson¹⁷⁹ : maladie neurodégénérative progressive du sujet âgé (la deuxième maladie neurodégénérative la plus fréquente en France, après la maladie d'Alzheimer) caractérisée par la mort de certains neurones, en particulier ceux qui utilisent la dopamine comme neurotransmetteur. Les lésions résultent de l'accumulation de protéines toxiques dans ces neurones. Les symptômes principaux sont une difficulté d'initiation des mouvements (akinésie), des mouvements ralentis (bradykinésie), une rigidité des membres (hypertonie), et un tremblement, survenant au repos. Ces manifestations sont améliorées au début par la L-DOPA, précurseur de la dopamine. Chez certains patients, les symptômes peuvent être améliorés par la stimulation cérébrale profonde.

Maladies neurodégénératives : maladies du système nerveux central caractérisées par la dégénérescence progressive des neurones – c'est-à-dire leur dysfonctionnement, puis leur mort. Ces affections sont aussi appelées maladies neuro-évolutives. Les plus connues sont la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson, la maladie de Huntington, la sclérose latérale amyotrophique, mais il y en a beaucoup d'autres.

Mental : qui se rapporte aux fonctions intellectuelles de l'esprit, du bas latin *mentalis* « de l'âme, de l'intellect », du latin classique *mens, mentis* « principe pensant, activité intellectuelle, intelligence ». Pour ce mot et ceux qui servent à sa définition, les sens peuvent être multiples et dépendent des emplois et des auteurs. Les définitions étant en partie tautologiques, nous donnons ici les définitions¹⁸⁰ les plus proches du sens utilisé dans l'avis.

- **Conscience** : connaissance immédiate de sa propre activité psychique, du latin *conscientia* ; connaissance partagée avec quelqu'un, de *conscire* de *cum* et *scire* savoir. La conscience est aussi utilisée relativement à la vigilance (« perte de conscience », « conscience de situation »).

¹⁷⁷ Leuthardt EC, Moran DW, Mullen TR. Defining Surgical Terminology and Risk for Brain Computer Interface Technologies. *Front Neurosci.* 2021 15:599549. doi:10.3389/fnins.2021.599549.

¹⁷⁸ [Journal officiel de l'Union européenne du 2-12-2022.](#)

¹⁷⁹ D'après, notamment, le [dossier INSERM sur la maladie de Parkinson.](#)

¹⁸⁰ Venant notamment du *Petit Robert* et du *Dictionnaire historique de la langue française Robert* sous la direction d'Alain Rey.

- **Esprit** : principe de la vie psychique tant affective qu'intellectuelle d'un individu, de *spiritus* souffle, air, respiration.
- **État mental** : état d'esprit d'une personne. Les états mentaux incluent la perception, l'expérience de douleur/plaisir, la croyance, le désir, l'intention, l'émotion et la mémoire. La définition exacte de ce terme est controversée.
- **Intellectuel** : qui se rapporte à l'intelligence (connaissance, entendement).
- **Pensée** : tout phénomène psychique conscient ou tout ensemble de représentations, d'images dans la conscience, de *pensare* fréquentatif de *pendere* « prendre ou peser ».
- **Psychique** : qui concerne l'esprit, la pensée en tant que principe auquel on rattache une catégorie de faits d'expérience, du grec ancien *psukhê* (Ψυχή), « souffle », « respiration »¹⁸¹.

Neural, neuronal, cérébral :

- **Neural** : relatif au système nerveux, qui englobe le système nerveux central (cerveau, tronc cérébral, cervelet, moelle épinière) et le système nerveux périphérique (nerfs sensitifs et moteurs) et le système nerveux végétatif. Ce terme inclut habituellement tous les composants cellulaires du tissu nerveux (neurones, cellules gliales, vaisseaux sanguins etc.)
- **Neuronal** : ce qui correspond à un neurone, un des types cellulaires bien définis du système nerveux.
- **Cérébral** : ce qui est relatif à l'organe cerveau, à l'exclusion du reste du système nerveux.

Neurologie, psychiatrie : la **neurologie** est la discipline médicale qui prend en charge les maladies du système nerveux (du grec *νεῦρον* (*neûron*), « corde, nerf » et du suffixe *λογία* (-logia), « étude de ») et la **psychiatrie** celle qui étudie et traite les maladies mentales et les troubles du psychisme (du grec *ψυχή* / *psykhê*, « souffle de vie, âme », et *ιατρός* / *iatrós*, « médecin »). Ces deux disciplines ont une longue et riche histoire et leurs frontières ont évolué au cours du temps. Elles sont formellement séparées en France depuis 1969. Pendant longtemps les deux disciplines étaient distinguées par l'absence d'altération du cerveau visible lors de l'examen anatomopathologique du cerveau de patients décédés avec une affection psychiatrique, mais les techniques récentes ont révélé des anomalies cérébrales morphologiques, cellulaires et moléculaires ou fonctionnelles dans beaucoup d'affections psychiatriques. L'ensemble des maladies du système nerveux, qu'elles soient neurologiques ou psychiatriques, forme un ensemble sans solution de continuité, comme le souligne le regroupement au niveau européen des différentes sociétés savantes et associations de patients au sein de l'*European Brain Council* (EBC) qui promeut l'usage du terme « maladies du cerveau ». En revanche comme la neurologie et la psychiatrie concernent des patients différents et utilisent des approches diagnostiques et thérapeutiques en partie différentes, leurs domaines d'expertise sont distincts et chacune tend à se diviser en sous-spécialités.

Neurologique définit ce qui correspond à un trouble du système nerveux et relève de la discipline médicale de la neurologie.

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

Neurotechnologies : les neurotechnologies « font référence aux appareils, systèmes et procédures – englobant à la fois le matériel et les logiciels – qui permettent d'accéder directement au système nerveux, de le surveiller, de l'analyser, d'en prévoir l'activité ou de le moduler, afin de comprendre, influencer, restaurer ou anticiper sa structure, son activité, sa fonction ou ses intentions (parole, motricité) »¹⁸².

¹⁸¹ Homère utilise ce mot pour traduire « fantôme » (âmes défunes rencontrées par Ulysse dans l'*Odyssée*). Psyché (souvent représentée comme une belle femme avec des ailes de papillon) est l'épouse immortelle de Cupidon, dieu romain de l'amour érotique et du désir dont l'homologue grec est Éros.

¹⁸² Recommandation sur l'éthique des Neurotechnologies, adoptée à la Conférence Générale de l'UNESCO le 12 Novembre 2025.

Paramètres physiologiques : il s'agit de paramètres mesurés sur une partie du corps hors du système nerveux qui sont contrôlés et modifiés par l'activité du système nerveux et en sont un reflet indirect. Ces paramètres incluent par exemple l'activité musculaire détectée par électromyographie ou la mesure des déplacements qu'elle induit (mouvements oculaires, mouvement de membres, déplacements du corps...) ainsi que les réactions végétatives correspondant à l'activation des systèmes nerveux végétatif sympathique et parasympathique qui contrôlent notamment le diamètre de la pupille, la dilatation des vaisseaux cutanés et la sudation (conductance cutanée), la fréquence cardiaque, la pression artérielle.

Plasticité cérébrale : capacité du système nerveux central à modifier sa structure et ses connections nerveuses. On parle aussi de **plasticité neuronale** ou de **neuroplasticité**, ou, lorsqu'elle désigne les variations d'efficacité des synapses, de **plasticité synaptique**, qui est un aspect central de l'apprentissage et de la mémoire. La plasticité cérébrale est une propriété essentielle du système nerveux, présente tout au long de la vie mais beaucoup plus marquée au cours du développement. Elle repose sur de très nombreux mécanismes à différentes échelles (moléculaire, cellulaires, anatomiques...) qui permettent aussi bien l'adaptation à l'environnement que la récupération après une lésion avec la mise en place de compensations.

Pseudonymisation : traitement de données à caractère personnel réalisé de manière à ce qu'on ne puisse plus attribuer les données relatives à une personne physique sans information supplémentaire.¹⁸³ Une donnée pseudonymisée reste une donnée à caractère personnel.

Sclérose latérale amyotrophique ou maladie de Charcot : maladie neurologique très grave liée à la dégénérescence progressive des neurones moteurs du cortex cérébral, du tronc cérébral et de la moelle épinière. Il en résulte une paralysie progressivement généralisée avec une impossibilité de respirer, de parler ou de déglutir.

Stéréotaxie : technique utilisée en neurochirurgie pour atteindre des zones du cerveau de manière précise. Elle permet de définir la position d'une structure grâce à un système de coordonnées 3D et de l'atteindre à l'aide d'un appareil permettant le positionnement selon ces coordonnées, pour placer une électrode ou d'autres instruments. La méthode ne nécessite qu'une ouverture limitée du crâne et le tissu cérébral traversé est peu altéré.

Stimulation cérébrale en boucle fermée : la stimulation est régulée par des signaux du cerveau, enregistrés par l'électrode de stimulation cérébrale elle-même ou une autre électrode placée à distance. La régulation nécessite un dispositif numérique qui effectue l'analyse et l'interprétation de ces signaux. Ce dispositif peut être implanté ou situé à distance du patient. En revanche, les dispositifs actuellement les plus utilisés, qui effectuent des stimulations selon un protocole préalablement défini sans régulation automatique, sont dits « en boucle ouverte ».

Stimulation cérébrale profonde (SCP ou *deep brain stimulation*, DBS) : stimulation électrique effectuée à l'aide d'électrodes (longue tige de 1-1,5 mm de diamètre) placées à l'intérieur du cerveau par chirurgie stéréotaxique. Selon les cas, le résultat peut être une augmentation ou une diminution de l'activité de la structure cérébrale dans laquelle est effectuée la stimulation électrique.

Stimulation électrique transcrânienne : procédure de stimulation à l'aide d'électrodes placées sur le cuir chevelu et délivrant un courant électrique de faible intensité, habituellement de type continu (*transcranial direct current stimulation*, TDCS). Les mécanismes d'action sur le tissu nerveux sont multiples et mal connus et peuvent comporter des excitations et des inhibitions de populations de neurones.

Stimulation magnétique transcrânienne (*transcranial magnetic stimulation*, TMS) : procédure de stimulation permettant d'agir de façon focalisée sur une région cérébrale particulière au moyen de champs électromagnétiques transitoires. Le champ électrique résultant peut modifier l'activité

¹⁸³ <https://www.cnil.fr/fr/technologies/lanonymisation-de-donnees-personnelles>

neuronale. La stimulation est effectuée avec un électroaimant placé à l'extérieur du crâne et de la peau, pour la recherche ou dans un but diagnostique ou de traitement de maladies neurologiques ou psychiatriques. Dans le cadre thérapeutique, il s'agit habituellement de stimulations répétitives (rTMS) qui peuvent avoir des effets durables.

Surcharge cognitive : la charge cognitive est un concept qui formalise le fait que les personnes ont à un instant donné une capacité limitée d'apprentissage et de résolution de problème. Cette capacité est notamment restreinte par le stockage d'informations en mémoire de travail. La surcharge cognitive survient lorsque la quantité d'informations à traiter simultanément dépasse la capacité de traitement.

Syndrome d'enfermement (*locked-in syndrome*) : état d'éveil et de conscience avec tétraplégie et paralysie des nerfs crâniens inférieurs résultant en une incapacité à montrer une expression faciale, à bouger, à parler ou à communiquer, sauf par mouvements oculaires.

Système nerveux : le système nerveux est un ensemble d'organes, comportant des neurones et d'autres cellules, permettant les interactions entre les différentes composantes du corps et les échanges bidirectionnels avec le monde extérieur. On distingue le *système nerveux central* qui comprend l'encéphale (cerveau, tronc cérébral, cervelet) et la moelle épinière, le *système nerveux périphérique* (nerfs sensitifs et moteurs), et le *système nerveux végétatif*. On inclut habituellement dans le système nerveux les organes des sens (œil, oreille interne, épithélium olfactif, et les multiples récepteurs disséminés dans la peau, les muscles, les tendons et les autres organes). Le système nerveux végétatif comprend l'ensemble des ganglions nerveux et des nerfs qui innervent les différents organes. Ils transmettent des informations sur leur état et le contrôlent entraînant par exemple la dilatation ou la contraction de la pupille ou des vaisseaux sanguins, l'accélération ou le ralentissement du cœur. Le système nerveux végétatif est divisé en système sympathique et parasympathique dont l'organisation anatomique et les neurotransmetteurs sont différents et les actions le plus souvent opposées (par exemple l'activation sympathique dilate la pupille, contracte les vaisseaux et accélère le cœur alors que l'activation parasympathique a les effets inverses).

Tétraplégie, paraplégie : la tétraplégie est la paralysie des quatre membres, la paraplégie la paralysie des deux membres inférieurs. Ces troubles sont liés à des lésions dans les voies motrices du système nerveux central. Lorsque la lésion est haute, une paralysie des muscles respiratoires peut-être associée, nécessitant une ventilation artificielle.

Tremblement essentiel : tremblement rapide qui survient lorsque le sujet effectue une action ou maintient une posture. Il ressemble au tremblement physiologique dont chacun a l'expérience, augmenté par la peur ou le froid. Le tremblement essentiel touche surtout les membres supérieurs et principalement les mains (en général les deux). Chez certains patients, la tête et le cou ou les cordes vocales sont également atteints (chevrotement de la voix). Très fréquent (300 000 personnes en France), il apparaît habituellement à l'âge adulte (dès 20 ans mais le plus souvent après 50 ans). Il peut exister un caractère familial. La cause est inconnue. Dans les formes invalidantes une amélioration peut être obtenue par stimulation cérébrale profonde ou lésion cérébrale localisée.

Annexes

Annexe 1 Aperçu scientifique et technique des neurotechnologies

Annexe 1-1 Aperçu historique

La première étape de **la lecture et de l'interprétation de l'activité cérébrale humaine** a été constituée par la mise en évidence de l'activité électrique du cerveau humain par Hans Berger entre 1924 et 1929¹⁸⁴ puis par la démonstration scientifique de son origine par Edgar Adrian¹⁸⁵, ouvrant la voie au développement de **l'électroencéphalographie (EEG)**¹⁸⁶. Cette méthode permet d'enregistrer l'activité électrique du cerveau à l'aide d'électrodes placées à la surface du crâne. Elle fournit par exemple des informations sur l'activité neuronale dans les épilepsies, sur les états de conscience dans différents types de comas ou les stades de sommeil. Depuis une quarantaine d'années, l'EEG a été perfectionné et d'autres méthodes ont été mises au point qui permettent la mesure précise de paramètres directement ou indirectement liés à l'activité cérébrale (Annexe 1-2). Ces technologies d'imagerie cérébrale ont permis de mieux comprendre les liens entre l'activité cérébrale et l'activité mentale et contribué de façon décisive à l'essor des neurosciences cognitives.

En ce qui concerne **l'action directe sur le fonctionnement cérébral**, si l'on exclut les drogues psychotropes de toutes sortes, utilisées pour certaines depuis l'aube de l'humanité, des méthodes « de choc » (choc thermique induit par malariathérapie, choc hypoglycémique induit par l'insuline) ont été utilisées en psychiatrie dans la première moitié du XX^e siècle. Dans les années 1940 ont été introduits les chocs électriques externes, connus sous le nom d'électrochocs ou sismothérapie. Malgré des effets positifs chez certains patients, cette méthode avait acquis une mauvaise réputation du fait de ses indications mal définies et de ses effets indésirables majeurs. Le raffinement ultérieur des indications et la réalisation des chocs sous anesthésie, dans des conditions très contrôlées, en font actuellement une méthode, appelée électroconvulsivothérapie (ECT), qui peut être utile dans certaines situations pour des patients souffrant de troubles psychiatriques graves et résistants aux autres traitements¹⁸⁷. Toutefois les mécanismes des effets thérapeutiques de l'ECT restent mal compris.

L'utilisation de **lésions cérébrales chirurgicales dans le but de traiter des affections psychiatriques (« psychochirurgie »)** est associée à Egas Moniz¹⁸⁸, qui avait proposé la leucotomie (section des fibres reliant le cortex préfrontal au reste du cerveau) à une époque où l'on ne disposait d'aucun traitement efficace des maladies mentales, ce qui lui avait valu le prix Nobel de physiologie et de médecine en 1949¹⁸⁹. Cette technique chirurgicale a ensuite été « simplifiée » (lobotomie transorbitaire) et utilisée de façon très abusive, en particulier aux États-Unis, mais également dans un contexte médical traditionnel en Europe¹⁹⁰. Ceci a suscité de fortes réactions et entraîné le discrédit de la psychochirurgie, d'autant que les premiers médicaments améliorant les symptômes des patients schizophrènes sont apparus dans les années 1950. **En neurologie, l'utilisation de lésions cérébrales**

¹⁸⁴ Berger H. Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten. 1929 87:527-70.

¹⁸⁵ Adrian ED, Matthews BHC. The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man. Brain. 1934 57:355-85. doi:10.1093/brain/awp324.

¹⁸⁶ Borck C. Between local cultures and national styles: units of analysis in the history of electroencephalography. C R Biol. 2006 329:450-9. doi:10.1016/j.crvi.2006.03.015.

¹⁸⁷ Weiner RD, Reti IM. Key updates in the clinical application of electroconvulsive therapy. Int Rev Psychiatry. 2017 29:54-62. doi:10.1080/09540261.2017.1309362.

¹⁸⁸ Missa JN, La psychochirurgie : histoire d'une pratique expérimentale. Médecine/Sciences. Partie 1, 11:1370-4 ; Partie 2, 13:1521-4.

¹⁸⁹ Moniz ultérieurement très critiqué partagea le prix Nobel avec un physiologiste suisse, Walter Rudolf Hess, dont les travaux étaient tout à fait respectables (mise en évidence chez l'animal du rôle d'une région du cerveau l'hypothalamus dans le contrôle de différentes fonctions corporelles de base - respiration, pression artérielle, miction, défécation - et certains comportements d'excitation ou de défense).

¹⁹⁰ Le récit autobiographique, issu de la thèse de doctorat d'Adèle Yon, présente, de façon émouvante et bien documentée, le point de vue de l'arrière-petite fille d'une patiente sur l'utilisation de la lobotomie en France dans les années 1950 - *Mon vrai nom est Élisabeth*, Éditions du sous-sol, Paris, 2025.

localisées pour traiter l'épilepsie remonte au début du XX^e siècle¹⁹¹. Ces lésions ont été utilisées plus largement durant les années 1940 pour traiter des épilepsies résistantes, puis dans les années 1960 pour améliorer certains troubles des mouvements (tremblement essentiel, maladie de Parkinson)¹⁹². Ce type de chirurgie s'est développé grâce aux méthodes de stéréotaxie¹⁹³ qui permettent de positionner très précisément, en trois dimensions, l'électrode introduite dans le cerveau pour détruire sélectivement la petite zone de tissu ciblée ou pour la stimuler¹⁹⁴. Des enregistrements et stimulations peropératoires ont d'abord été utilisés pour améliorer la précision de la lésion. C'est dans ce contexte qu'a été mise au point la stimulation cérébrale profonde (SCP) par Alim-Louis Benabid, Pierre Pollak et leurs collaborateurs qui ont remarqué que la simple stimulation électrique du tissu pouvait dans certaines conditions entraîner les mêmes effets que sa destruction et ont proposé de remplacer la lésion par une stimulation permanente par une électrode laissée en place¹⁹⁵. L'efficacité de cette méthode non destructrice a ouvert une voie nouvelle au traitement de certaines affections neurologiques (maladie de Parkinson, tremblement essentiel, dystonies...) et psychiatriques (troubles obsessionnels compulsifs résistants et autres affections en cours d'exploration). Récemment sont apparues des technologies qui permettent de réaliser des lésions très localisées du cerveau sans franchir la peau, ni ouvrir la boîte crânienne. C'est en particulier le cas des rayons gamma et des ultrasons focalisés guidés par imagerie par résonance magnétique (MRgFUS). Ce type d'approches « non chirurgicales » est utilisé par exemple pour traiter le tremblement essentiel et pourrait fournir des alternatives à la stimulation cérébrale profonde¹⁹⁶.

Le **concept d'interface cerveau-ordinateur** à proprement parler a été présenté pour la première fois par Jacques Vidal, de l'université de Californie à Los Angeles, qui proposait dès 1973 d'utiliser l'enregistrement des signaux électriques du cerveau pour piloter un dispositif externe à l'aide d'un ordinateur¹⁹⁷. De nombreux travaux, surtout depuis les années 2000, ont montré que cela était possible. Ainsi, l'enregistrement de l'activité corticale chez des sujets ayant des paralysies sévères leur a permis de piloter un curseur sur un écran. Il a ensuite été possible de reconstituer par écrit ou par synthèse vocale des paroles dont la prononciation était seulement ébauchée par le sujet paralysé, d'effectuer un geste par l'intermédiaire d'un membre artificiel, ou de se mouvoir grâce à un exosquelette robotisé (neuroprothèses). Ces recherches ont été effectuées dans différents pays mais tout particulièrement aux États-Unis, où la recherche dans ce domaine a, en particulier, été soutenue

¹⁹¹ Brigo F, Di Gennaro G, Morano A, Sironi VA, Lorusso L; Study Group on the History of Neurology and of the Study Group on Epilepsy of the Italian Neurological Society. Camillo Negro (1861-1927) and Antonio Carle (1854-1927): Pioneers of non-resective surgical approach to epilepsy treatment. *Epilepsy Behav.* 2021 125:108360. doi:10.1016/j.yebeh.2021.108360.

¹⁹² Zanello M, Pallud J, Baup N, Peeters S, Turak B, Krebs MO, Oppenheim C, Gaillard R, Devaux B. History of psychosurgery at Sainte-Anne Hospital, Paris, France, through translational interactions between psychiatrists and neurosurgeons. *Neurosurg Focus.* 2017 43(3):E9. doi: 10.3171/2017.6.FOCUS17250.

¹⁹³ La chirurgie stéréotaxique du cerveau humain a été introduite à la fin des années 1940 (Spiegel EA, Wycis HT, Marks M, Lee AJ. Stereotaxic Apparatus for Operations on the Human Brain. *Science.* 1947 106:349-50. doi:10.1126/science.106.2754.349). Le neurochirurgien Jean Talairach, à l'hôpital Sainte-Anne, a joué un rôle pionnier essentiel dans le développement de la chirurgie et des enregistrements stéréotaxiques chez l'homme (Mazoyer B. In memoriam: Jean Talairach (1911-2007): a life in stereotaxy. *Hum Brain Mapp.* 2008 29:250-2. doi:10.1002/hbm.20473).

¹⁹⁴ Hariz MI, Blomstedt P, Zrinzo L. Deep brain stimulation between 1947 and 1987: the untold story. *Neurosurg Focus.* 2010 29:E1. doi:10.3171/2010.4.FOCUS10106.

¹⁹⁵ Benabid AL, Pollak P, Louveau A, Henry S, de Rougemont J. Combined (thalamotomy and stimulation) stereotactic surgery of the VIM thalamic nucleus for bilateral Parkinson disease. *Appl Neurophysiol.* 1987 50:344-6. doi:10.1159/000100803 ; Pollak P, Burkhard P, Vingerhoets F. Stimulation cérébrale profonde : passé, présent et avenir. *Rev Med Suisse.* 2015 11:958-61. doi:10.53738/REVMED.2015.11.472.0958.

¹⁹⁶ Shiramba A, Lane S, Ray N, Gilbertson T, Srinivasaiah R, Panicker J, Radon M, Osman-Farah J, Macerollo A. Efficacy and Safety of Magnetic Resonance-Guided Focused Ultrasound Thalamotomy in Essential Tremor: A Systematic Review and Metanalysis. *Mov Disord.* 2025 40:1020-33. doi:10.1002/mds.30188. ; Rodriguez-Oroz MC, Martínez-Fernández R, Lipsman N, Horisawa S, Moro E. Bilateral Lesions in Parkinson's Disease: Gaps and Controversies. *Mov Disord.* 2025 40:231-40. doi:10.1002/mds.30090.

¹⁹⁷ Vidal JJ. Toward direct brain-computer communication. *Annu Rev Biophys Bioeng.* 1973 2:157-80. doi: 10.1146/annurev.bb.02.060173.001105.

depuis le début par l'agence de recherche du ministère de la défense (*Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA*)¹⁹⁸.

Les méthodes actuellement utilisées pour mesurer (« lire ») ou modifier (« écrire ») l'activité cérébrale sont décrites dans la section suivante.

Annexe 1-2 Les méthodes de mesure de l'activité cérébrale

A1-2.1. Les interfaces cerveau-machine invasives

Les interfaces cerveau-machine utilisées pour la lecture de l'activité cérébrale sont, dans l'immense majorité des cas, des électrodes, capables de détecter de très faibles variations de potentiel ou de courant électriques liées à l'activité cérébrale. Les dispositifs invasifs nécessitent l'ouverture de la boîte crânienne et l'introduction d'une électrode dans ou au contact du cerveau. Il peut s'agir de matrices de plusieurs centaines de microélectrodes (*microelectrode arrays*) placées à la surface du cortex ou de longues aiguilles, avec plusieurs points d'enregistrement, dont la position à l'intérieur du cerveau est contrôlée précisément grâce à la méthode stéréotaxique¹⁹⁹. Ces électrodes sont connectées à un dispositif (« boîtier de connexion ») qui peut lui-même être implanté ou situé à l'extérieur du corps, relié par un câble ou un système sans fil. Des dispositifs grossièrement similaires sont utilisés pour la stimulation électrique ou pour l'enregistrement de l'activité des neurones. La qualité du signal recueilli par ces électrodes est excellente et peu bruitée, mais reflète uniquement l'activité des neurones du voisinage immédiat, dont la densité est très élevée (plusieurs dizaines de milliers de neurones par mm³ dans le cortex humain²⁰⁰). L'électrode peut être laissée en place pour un temps bref (quelques jours, lors d'enregistrements de repérage avant traitement chirurgical des épilepsies résistantes aux autres traitements) ou à demeure par exemple pour les systèmes en boucle²⁰¹ décrits plus loin. Les dispositifs d'enregistrement utilisés pour actionner une prothèse (par exemple, synthèse de parole ou mouvement d'un robot) sont également implantés à long terme.

Diverses techniques sont à l'étude pour éviter ou minimiser l'ouverture du crâne. Le terme de dispositif à caractère invasif « minime » (*minimally invasive*) est souvent employé dans ce cas, même si les complications liées à la mise en place et à la présence de matériel à l'intérieur du corps ne peuvent être complètement éliminées²⁰². Dans les dispositifs intravasculaires, les électrodes sont placées dans un sinus veineux à proximité du tissu cérébral à partir d'une veine périphérique (selon le même principe que les cathéters utilisés en radiologie)²⁰³. Dans d'autres cas il s'agit d'électrodes placées sous la peau, qui pénètrent seulement partiellement l'os.

¹⁹⁸ Miranda RA, Casebeer WD, Hein AM, Judy JW, Krotkov EP, Laabs TL, Manzo JE, Pankratz KG, Pratt GA, Sanchez JC, Weber DJ, Wheeler TL, Ling GS. DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies. *J Neurosci Methods*. 2015 244:52-67. doi:10.1016/j.jneumeth.2014.07.019.

¹⁹⁹ La méthode stéréotaxique, utilisée en neurochirurgie, permet de repérer et d'atteindre très précisément une cible à l'intérieur du cerveau définie par ses coordonnées en 3 dimensions. Les données d'imagerie cérébrale permettent de corriger les variations interindividuelles.

²⁰⁰ Shapson-Coe A, Januszewski M, Berger DR, Pope A, Wu Y, Blakely T, Schalek RL, Li PH, Wang S, Maitin-Shepard J, Karlupia N, Dorkenwald S, Sjostedt E, Leavitt L, Lee D, Troidl J, Collman F, Bailey L, Fitzmaurice A, Kar R, Field B, Wu H, Wagner-Carena J, Aley D, Lau J, Lin Z, Wei D, Pfister H, Peleg A, Jain V, Lichtman JW. A petavoxel fragment of human cerebral cortex reconstructed at nanoscale resolution. *Science*. 2024 384:eadk4858. doi:10.1126/science.adk4858.

²⁰¹ Il est habituel de distinguer les dispositifs en boucle ouverte (*open-loop*) dans lesquels la stimulation cérébrale est continue avec des paramètres prédéfinis (même si des réglages externes sont possibles) et les systèmes en boucle fermée (*closed-loop*) dans lesquels la stimulation s'adapte automatiquement à des signaux captés localement ou dans une autre région du cerveau. Seuls les systèmes en boucle fermée nécessitent l'association d'un dispositif d'enregistrement au dispositif de stimulation. Les systèmes en boucle ouverte ne requièrent que la composante de stimulation.

²⁰² Minimally invasive Defining Surgical Terminology and Risk for Brain Computer Interface Technologies. Leuthardt EC, Moran DW, Mullen TR *Front Neurosci*. 2021 15:599549. PMID: 33867912 DOI:10.3389/fnins.2021.599549

²⁰³ Mitchell P, Lee SCM, Yoo PE, Morokoff A, Sharma RP, Williams DL, MacIsaac C, Howard ME, Irving L, Vrljic I, Williams C, Bush S, Balabanski AH, Drummond KJ, Desmond P, Weber D, Denison T, Mathers S, O'Brien TJ, Mocco J, Grayden DB, Liebeskind DS, Opie NL, Oxley TJ, Campbell BCV. Assessment of Safety of a Fully Implanted Endovascular Brain-Computer Interface for Severe Paralysis in 4 Patients: The Stentrode with Thought-Controlled Digital Switch (SWITCH) Study. *JAMA Neurol*. 2023 80:270-8.

A1-2.2. Les interfaces cerveau-machine non-invasives

Les méthodes non-invasives utilisées en médecine ou en recherche pour détecter et analyser l'activité cérébrale nécessitent de gros équipements réservés à des hôpitaux ou des centres spécialisés. L'enregistrement de l'activité électrique du cerveau se fait par électroencéphalographie (EEG) habituellement effectuée dans un cadre hospitalier avec de nombreuses électrodes posées sur le scalp, qui détectent les variations globales de potentiel électrique du cortex cérébral sous-jacent. Une autre technique utilisée en recherche détecte les changements de champ magnétique accompagnant l'activité électrique (magnétoencéphalographie – MEG²⁰⁴). D'autres méthodes d'imagerie cérébrale mesurent indirectement la consommation d'oxygène liée à l'activité cérébrale, en détectant par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) le changement des propriétés magnétiques de l'hémoglobine selon son état d'oxygénation (effet BOLD, *blood oxygen level-dependent*). Une méthode moins précise mais dont le dispositif est plus léger est la spectroscopie en proche infrarouge fonctionnelle (SPIRF). Pour toutes ces méthodes la taille des dispositifs de recueil ne permet actuellement pas leur utilisation en dehors de laboratoires de recherche ou des services spécialisés d'imagerie cérébrale.

En revanche, il existe d'autres dispositifs légers de mesure de l'activité électrique cérébrale, qui sont portatifs (*wearables*) et dont la technologie fait l'objet de nombreux développements²⁰⁵. Ces interfaces cerveau-machine non-invasives enregistrent des signaux de type EEG avec des dispositifs plus simples, plus légers et plus discrets que les appareils à usage médical. Ils n'entravent pas les activités des personnes et peuvent passer inaperçus. Il peut s'agir d'électrodes placées dans un couvre-chef en tissu ou un casque, dans des lunettes (ou des grosses lunettes « *goggles* ») ou dans des « écouteurs » intraauriculaires. Le signal recueilli est transmis à un boîtier avec un système filaire ou simplement à un smartphone en Bluetooth. Toutefois, les signaux détectés par ces dispositifs simplifiés sont faibles, bruités et ne donnent qu'une indication très grossière de l'activité cérébrale globale sans la résolution spatiale de l'EEG classique.

A1-2.3. Les informations renseignant indirectement sur l'activité cérébrale

Le fonctionnement du cerveau a en permanence des conséquences sur le reste du corps qui peuvent être facilement enregistrées. Ces paramètres, dits « physiologiques », peuvent inclure l'activité musculaire détectée par électromyographie ou par les déplacements qu'elle induit (mouvements oculaires, mouvement de membres, déplacements du corps...) et qui renseignent sur l'objet de l'attention de la personne (mouvements oculaires) ou ses réactions. D'autre part, les réactions végétatives, en lien avec l'état émotionnel, correspondent à l'activation des systèmes nerveux sympathique et parasympathique, qui contrôlent le diamètre de la pupille, la dilatation des vaisseaux cutanés et la sudation (conductance cutanée), la fréquence cardiaque, la pression artérielle, etc. Certaines de ces modifications peuvent être perçues par le sujet, mais sont partiellement (activités musculaires) ou complètement (réactions végétatives) involontaires. L'enregistrement par un bracelet

doi:10.1001/jamaneurol.2022.4847; Brannigan JFM, Fry A, Opie NL, Campbell BCV, Mitchell PJ, Oxley TJ. Endovascular Brain-Computer Interfaces in Poststroke Paralysis. *Stroke*. 2024 55:474-83. doi:10.1161/strokeaha.123.037719.

²⁰⁴ Les appareils de MEG sont volumineux et nécessitent des électroaimants maintenus à très basse température (*superconducting quantum interference devices*, SQUIDS). Le développement de nouveaux détecteurs (*optically pumped magnetometers*, OPMs) permet la mise au point d'appareils plus petits compatibles avec les mouvements. Brookes MJ, Leggett J, Rea M, Hill RM, Holmes N, Boto E, Bowtell R. Magnetoencephalography with optically pumped magnetometers (OPM-MEG): the next generation of functional neuroimaging. *Trends Neurosci*. 2022 45:621-34. doi:10.1016/j.tins.2022.05.008.

²⁰⁵ Zhang J, Li J, Huang Z, Huang D, Yu H, Li Z. Recent Progress in Wearable Brain-Computer Interface (BCI) Devices Based on Electroencephalogram (EEG) for Medical Applications: A Review. *Health Data Sci*. 2023 3:0096. doi:10.34133/hds.0096; Zhong X, Li G, Xu C, Luo R, Meng J, Schalk G. Detection of eye movements and eye blinks using a portable two-channel EEG platform. *J Neurosci Methods*. 2026 425:110616. doi:10.1016/j.jneumeth.2025.110616.

des activités musculaires (électromyogramme) peut permettre de « prédire » les mouvements des doigts et ainsi de faire apparaître un texte sur un écran d'ordinateur sans clavier physique²⁰⁶. Les auteurs proposent de désigner de tels dispositifs sous le nom d'interfaces humain-ordinateur. Les variations de fréquence cardiaque, la conductance électrique cutanée et le diamètre pupillaire renseignent sur l'état émotionnel. Ces signaux physiologiques sont pour certains déjà recueillis par les montres connectées utilisées pour le suivi de l'activité physique (nombre de pas...), l'entraînement sportif, le suivi du sommeil. L'étude de la parole lors des conversations téléphoniques peut fournir des informations sur l'humeur ou certaines pathologies, même si le contenu sémantique en est éliminé.

Bien évidemment le recueil de telles informations « physiologiques » ne relève pas au sens strict des interfaces cerveau-machine, mais peut leur être facilement associé. Ces informations pour la plupart indépendantes de la conscience ou de la volonté de la personne, seules ou combinées au recueil de l'activité cérébrale, peuvent être utilisées pour inférer des états psychiques et pour contribuer à l'apprentissage automatique de la signification des données recueillies par interfaces cerveau-machine. Ce point est important car le rapprochement de données neurales recueillies par interfaces cerveau-machine et de données corporelles physiologiques ou comportementales accroît les potentiels d'utilisation au bénéfice des individus mais aussi les risques de mésusages. Si de telles données sont utilisées dans un cadre médical pour le suivi de traitements à domicile (en environnement dit *écologique*), notamment en cardiologie ou en psychiatrie, il s'agit de données à caractère médical bénéficiant des protections correspondantes. En revanche la situation est plus problématique si elles sont recueillies à l'insu des personnes, même si un accord leur est demandé dans le cadre d'applications de bien-être ou de suivi sportif.

Annexe 1-3 Les méthodes de modification de l'activité cérébrale

A1-3.1. La stimulation cérébrale profonde (SCP)

La stimulation cérébrale profonde est réalisée par une électrode placée dans la profondeur du cerveau. Les dispositifs usuels délivrent de manière continue des impulsions électriques, générées par un boîtier situé sous la peau, généralement sous la clavicule à la face avant du thorax. Un réglage par télécommande est possible, ce qui est important pour le réglage initial et les adaptations ultérieures. Le boîtier est muni de piles dont le changement nécessite une intervention chirurgicale, mais il existe actuellement des possibilités de charge transcutanée, évitant l'intervention. La stimulation cérébrale profonde est devenue un traitement de choix de certaines affections neurologiques, en particulier des troubles du mouvement (maladie de Parkinson, dystonies, tremblements essentiels, voir 2.3). Les mécanismes d'action de la SCP sont complexes et dépendent des régions stimulées et des paramètres de stimulation utilisés. Ils restent discutés, même s'il semble qu'un effet important soit, dans le cas de la maladie de Parkinson, l'inhibition fonctionnelle de la région stimulée, comme cela était initialement suggéré par son utilisation pour remplacer la chirurgie destructrice.

Dans certaines affections il est utile non pas de stimuler en permanence mais uniquement lorsque cela est nécessaire. Ainsi des systèmes en « boucle fermée » ont été développés et utilisés pour traiter l'épilepsie résistante : lorsque le dispositif implanté détecte une activité anormale dans le foyer épileptique, pouvant précéder une crise d'épilepsie, il déclenche la stimulation qui en prévient la survenue. Les travaux en cours explorent plus largement l'intérêt des systèmes en boucle fermée, qui auraient l'avantage d'adapter la stimulation aux besoins, y compris dans des affections bénéficiant

²⁰⁶ Kaifosh P, Reardon TR; CTRL-labs at Reality Labs. A generic non-invasive neuromotor interface for human-computer interaction. Nature. 2025 645:702-11. doi:10.1038/s41586-025-09255-w. PMID: 40702190. Cette approche est développée avec l'objectif de remplacer l'utilisation du clavier pour interagir avec un ordinateur.

déjà de la stimulation continue (dite « en boucle ouverte »). Cette méthode est de plus en plus utilisée et pourrait ouvrir de nouvelles possibilités thérapeutiques. À titre d'exemple, la possibilité de stimuler une région du cerveau en fonction de l'activité d'une autre région a été proposée dans la dépression résistante au traitement²⁰⁷. Il faut souligner que des recherches sont encore nécessaires pour identifier les circuits à cibler tout autant que les paramètres de détection et de stimulation. Les dispositifs complexes ainsi développés peuvent être davantage exposés aux erreurs et la reconstitution a posteriori des mécanismes d'événements indésirables éventuels peut être difficile.

A1-3.2. Stimulation cérébrale non-invasive

La stimulation magnétique transcrânienne (*transcranial magnetic stimulation*, TMS) consiste à générer un champ magnétique localisé avec un électroaimant placé à proximité du crâne. La TMS est utilisée dans un but diagnostique et en recherche en sciences cognitives, pour perturber localement certaines régions du cortex et en déduire ainsi la fonction. Elle est également utilisée dans un but thérapeutique dans diverses affections neurologiques et psychiatriques²⁰⁸ ou certaines douleurs réfractaires. Ce type de traitement est réalisé en ambulatoire chez des patients conscients avec généralement des stimulations répétées au cours de sessions également répétées (rTMS). D'autres méthodes font appel à différents types de courants électriques, désignées sous le nom de stimulations électriques transcrâniennes (*transcranial electric stimulation*, tES), réalisées selon différents protocoles utilisant du courant continu (*transcranial direct current stimulation*, tDCS) ou alternatif (*transcranial alternating current stimulation*, tACS)²⁰⁹. Ce dernier protocole peut être réalisé en alternant au hasard des fréquences basses et élevées (*transcranial random noise stimulation*, tRNS). Dans certains cas, la miniaturisation des dispositifs les rend utilisables à domicile. Des dispositifs de ce type sont disponibles à la vente en ligne sans validation ni contrôle, et il existe même des instructions pour fabriquer soi-même son stimulateur électrique cérébral. Ces pratiques comportent évidemment des risques pour les utilisateurs.

L'activité électrique normale du cerveau est soumise à différentes variations périodiques ou rythmes cérébraux, visibles sur l'EEG. Ces rythmes peuvent être localisés à une seule région du cerveau ou en inclure plusieurs et les synchroniser. Les rythmes corticaux sont associés aux cycles de veille-sommeil, à différents états de conscience²¹⁰ et certains rythmes de l'hippocampe (thêta) sont impliqués dans la mémorisation. Certaines techniques de stimulation pourraient moduler ces rythmes endogènes de manière non-invasive et sont envisagées par certains pour modifier les capacités du cerveau (relaxation, mémoire...). Des auteurs proposent même d'utiliser ce moyen pour faciliter la synchronisation entre plusieurs cerveaux humains et, pensent-ils, améliorer le travail d'équipe de pilotes militaires²¹¹. L'utilisation de telles approches en dehors de justifications thérapeutiques solidement étayées soulève à l'évidence des questions éthiques.

²⁰⁷ Closed-loop neuromodulation in an individual with treatment-resistant depression. Scangos KW, Khambhati AN, Daly PM, Makhoul GS, Sugrue LP, Zamanian H, Liu TX, Rao VR, Sellers KK, Dawes HE, Starr PA, Krystal AD, Chang EF. *Nat Med.* 2021 27:1696-700. doi:10.1038/s41591-021-01480-w.

²⁰⁸ Kan RLD, Padberg F, Giron CG, Lin TTZ, Zhang BBB, Brunoni AR, Kranz GS. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex on symptom domains in neuropsychiatric disorders: a systematic review and cross-diagnostic meta-analysis. *Lancet Psychiatry.* 2023 10:252-9. doi:10.1016/S2215-0366(23)00026-3.

²⁰⁹ Liu A, Vöröslakos M, Kronberg G, Henin S, Krause MR, Huang Y, Opitz A, Mehta A, Pack CC, Krekelberg B, Berényi A, Parra LC, Melloni L, Devinsky O, Buzsáki G. Immediate neurophysiological effects of transcranial electrical stimulation. *Nat Commun.* 2018 9:5092. doi:10.1038/s41467-018-07233-7.

²¹⁰ On désigne ces rythmes dans l'EEG par une lettre grecque selon leur fréquence: ondes delta (1-3,5 Hz, ex. sommeil profond), thêta (4-7 Hz, ex. sommeil léger), alpha (8-13 Hz, ex. conscience flottante), bêta (14-35 Hz, conversation, activité mentale), et gamma (35-80 Hz, observées transitoirement dans des opérations de perception).

²¹¹ Lu H, Zhang Y, Huang P, Zhang Y, Cheng S, Zhu X. Transcranial electrical stimulation offers the possibility of improving teamwork among military pilots: a review. *Front Neurosci.* 2022 16:931265. doi:10.3389/fnins.2022.931265.

A1-3.3. *Neuro-feedback* et stimulations par canaux sensoriels naturels

Dans les méthodes de *neuro-feedback*, le sujet visualise son EEG sous une forme plus ou moins fruste et imagée et tente de modifier son activité mentale pour favoriser l'apparition d'un rythme cortical particulier. Certains dispositifs génèrent un signal, musical par exemple, pour faciliter la tâche. Dans d'autres cas, les canaux sensoriels physiologiques sont sollicités pour tenter d'influencer les rythmes à l'aide de stimuli visuels ou sonores à la fréquence souhaitée. Certaines de ces approches font déjà l'objet de dispositifs commercialisés dont l'efficacité n'est en général pas évaluée.

A1-3.4. Techniques permettant la stimulation ou la lésion cérébrale en profondeur sans franchissement de la peau

De nouvelles méthodes de stimulation cérébrale en profondeur mais utilisant un générateur externe d'ultrasons sont développées²¹² à la faveur des avancées technologiques rapides dans ce domaine. Il est possible par exemple de stimuler une région précise du cerveau à l'aide d'ultrasons générés par un dispositif portatif dont la focalisation est adaptée aux caractéristiques de chaque personne²¹³. La place que ces nouvelles technologies est susceptible de prendre en thérapeutique est difficile à évaluer mais elles suscitent beaucoup d'intérêt.

Il faut mentionner enfin l'existence de techniques de destruction localisée du tissu cérébral profond qui ne nécessitent pas de geste neurochirurgical classique, mais utilisent les rayons gamma (*gamma-knife surgery*)²¹⁴ ou les ultrasons²¹⁵. Ces méthodes ont un grand intérêt lorsqu'il s'agit par exemple de détruire une tumeur. En neurochirurgie « fonctionnelle », leur place reste à déterminer, mais elles soulèvent des espoirs thérapeutiques et des interrogations éthiques. Deux points doivent être soulignés. D'une part, il s'agit de méthodes destructives et la lésion créée lors de l'intervention est irréversible. D'autre part, le caractère apparemment « non-invasif », puisqu'il n'y a pas d'ouverture chirurgicale de la peau, peut donner une apparence de bénignité trompeuse à ce type d'intervention. Réalisées dans un contexte médical et scientifique rigoureux et avec un encadrement éthique solide, elles sont susceptibles d'apporter des bénéfices à certains patients. En revanche, il existe des risques évidents de dérive avec un élargissement abusif des indications et un contrôle faible ou inexistant, qui pourrait conduire à une situation rappelant les abus de la psychochirurgie à ses débuts. Une grande vigilance doit donc être exercée dans ce domaine.

A1-3.5. Limites et difficultés techniques des neurotechnologies numériques

Dans le cas des dispositifs implantés, une difficulté rencontrée pour le maintien prolongé de matériel dans le cerveau, qu'il soit destiné à des enregistrements ou à des stimulations, tient aux réactions chimiques et cellulaires qui prennent place autour de l'électrode et à la réaction fibreuse qui peuvent l'altérer et en diminuer la sensibilité. Les recherches actuelles ont pour but d'améliorer la souplesse et la biocompatibilité des matériaux utilisés, ainsi que la miniaturisation des dispositifs.

²¹² Barksdale BR, Enten L, DeMarco A, Kline R, Doss MK, Nemeroff CB, Fonzo GA. Low-intensity transcranial focused ultrasound amygdala neuromodulation: a double-blind sham-controlled target engagement study and unblinded single-arm clinical trial. *Mol Psychiatry*. 2025 30:4497-511. doi:10.1038/s41380-025-03033-w.

²¹³ Attali D, Tiennot T, Manuel TJ, Daniel M, Houdouin A, Annic P, Dizeux A, Haroche A, Dadi G, Henensal A, Moyal M, Le Berre A, Paolillo C, Charron S, Debacker C, Lui M, Lekcir S, Mancusi R, Gallarda T, Sharshar T, Sylla K, Oppenheim C, Cachia A, Tanter M, Aubry JF, Plaze M. Deep transcranial ultrasound stimulation using personalized acoustic metamaterials improves treatment-resistant depression in humans. *Brain Stimul*. 2025 18:1004-14. doi:10.1016/j.brs.2025.04.018.

²¹⁴ Chintapalli R, Chang S, Kaprealian T, Savjani R, Tenn S, Bari A. Gamma knife versus linear accelerator thalamotomy for essential tremor and Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis. *J Clin Neurosci*. 2025 133:111050. doi:10.1016/j.jocn.2025.111050.

²¹⁵ Ko TH, Lee YH, Chan L, Tsai K, Hong CT, Lo WL. Magnetic Resonance-Guided focused ultrasound surgery for Parkinson's disease: A mini-review and comparison between deep brain stimulation. *Parkinsonism Relat Disord*. 2023 111:105431. doi:10.1016/j.parkreldis.2023.105431

Le développement très rapide des méthodes d'analyse des signaux, en particulier grâce à l'apprentissage automatique, ont permis des progrès dans l'utilisation des interfaces cerveau-machine, mais, qu'il s'agisse de dispositifs invasifs ou non, il n'y a pas de lien initial a priori entre les signaux enregistrés et leur signification (par exemple l'ébauche de mouvement ou de parole intérieure). Ce lien est établi par une répétition de l'enregistrement et l'apprentissage automatique qui l'établit sur des bases statistiques. Cela nécessite un investissement de la part du sujet dont l'importance dépend de l'objectif recherché, selon qu'il s'agit d'un simple déplacement de curseur sur un écran ou de la production de langage complexe. Dans ce dernier cas, les techniques d'analyse utilisent aussi des systèmes d'intelligence artificielle générative pour déterminer le mot le plus probable et rendre le décodage plus efficace. Mais cela peut ralentir le processus et créer des biais ou des erreurs plus ou moins difficiles à corriger. La phase d'apprentissage ne peut bénéficier que partiellement de l'expérience préalable avec d'autres sujets du fait des différences interindividuelles. Dans tous les cas, la collecte d'une grande quantité de données neurales est nécessaire, ce qui soulève de manière claire les questions liées à la gestion et à la protection de celles-ci.

Les différentes régions du cerveau sont spécialisées dans des fonctions différentes même si elles sont en constante interaction. La spécificité des aires corticales est bien connue et les enregistrements intracrâniens ne renseignent que sur l'activité de la petite zone où sont placées les électrodes. C'est d'ailleurs une objection théorique à l'idée de développer des interfaces « généralisées » qui nécessiteraient un nombre rédhibitoire de capteurs. En ce qui concerne les stimulations, celles qui sont utilisées dans un but de modulation perturbent de façon globale l'activité d'une région et le mécanisme des effets thérapeutiques est difficile à établir (inhibition ou activation globale de la fonction, entraînement des décharges au rythme de la stimulation, effets à distance notamment sur les fibres de passage, etc.).

Les interfaces cerveau-machine dont l'objectif est de transmettre une information directement au cerveau dans le cas de déficit d'un nerf sensoriel par exemple se heurtent au manque de précision des méthodes utilisables. Des stratégies pour surmonter cette difficulté sont utilisées en recherche dans les modèles animaux (par exemple optogénétique, voir Annexe 1-4) mais leur application humaine est très difficile à mettre en œuvre, même au niveau d'un organe sensoriel comme la rétine²¹⁶ et a fortiori dans le cerveau. Les limites de résolution spatiale des méthodes d'enregistrement ou de stimulation invasives sont encore plus marquées en ce qui concerne les méthodes non-invasives. Cela n'empêche pas que des effets thérapeutiques puissent être démontrés mais les objectifs qui peuvent être envisagés demeurent à ce jour restreints.

Annexe 1-4 Informations issues de la recherche expérimentale chez l'animal

A1-4.1. Méthodes actuelles en recherche expérimentale

Lecture de l'activité cérébrale. Les méthodes couramment utilisées *in vivo* chez l'animal donnent accès aux variations de potentiel électrique et aux courants transmembranaires avec une très grande précision. Les enregistrements de l'activité de neurones uniques sont surtout réalisés par la technique de *patch-clamp* qui a été une véritable révolution en neurosciences²¹⁷. Les enregistrements à

²¹⁶ Sahel JA, Boulanger-Scemama E, Pagot C, Arleo A, Galluppi F, Martel JN, Esposti SD, Delaux A, de Saint Aubert JB, de Montleau C, Gutman E, Audo I, Duebel J, Picaud S, Dalkara D, Blouin L, Tiel M, Roska B. Partial recovery of visual function in a blind patient after optogenetic therapy. Nat Med. 2021 27:1223-9. doi:10.1038/s41591-021-01351-4.

²¹⁷ Dans la technique de *patch-clamp*, qui a valu à ses inventeurs, Erwin Neher et Bert Sakmann, le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1991, l'électrode est une micropipette dont l'extrémité très fine (diamètre de l'ordre du μm) est placée au contact de la membrane de la cellule. Une légère succion permet d'assurer une étanchéité et une isolation électrique très fortes (résistance de l'ordre du giga-Ohm, *gigaseal*). Le morceau de membrane attaché est suffisamment petit pour enregistrer l'activité (ouverture/fermeture) d'un seul canal ionique à

l'extérieur des cellules, quant à eux, permettent de détecter les potentiels d'action (*spikes* en anglais) émis par un ou plusieurs neurones dans le voisinage. Des électrodes disposant de multiples points de contact indépendants permettent de détecter simultanément l'activité de nombreux neurones²¹⁸. Ces technologies peuvent, dans certains cas, être utilisées chez des patients humains au cours d'interventions neurochirurgicales²¹⁹. À côté des enregistrements électriques, des méthodes réservées aux expériences chez l'animal permettent de mesurer optiquement l'activité neuronale grâce à des molécules dont la fluorescence change selon le potentiel ou la présence de certains ions. D'autres molécules fluorescentes permettent la mesure de libération de neurotransmetteurs ou l'étude de réactions biochimiques à l'intérieur des cellules, au cours d'activités comportementales de l'animal. Ces « biosenseurs » sont des protéines exprimées spécifiquement dans les neurones d'intérêt à l'aide de techniques de génie génétique. Les variations de fluorescence sont mesurées avec des dispositifs suffisamment miniaturisés pour permettre des enregistrements chez des animaux libres de leurs mouvements (microscopes pourvus d'objectifs de très petite taille ou fibres optiques placées à l'intérieur du cerveau). Ces méthodes permettent d'enregistrer simultanément de nombreux neurones et d'étudier leur activité au cours de tâches comportementales. Ainsi, c'est grâce à ce type de mesure qu'ont été découverts les ensembles neuronaux dont l'activité coordonnée est directement liée à la fonction du tissu nerveux²²⁰. Ces différentes approches révèlent le degré de complexité du fonctionnement des neurones et permettent d'en aborder la logique, à la différence des enregistrements à moindre résolution par les interfaces cerveau-machine dont les données sont interprétées par apprentissage automatique²²¹.

Modification de l'activité cérébrale. La stimulation électrique et les lésions localisées ont été utilisées pendant de nombreuses années en expérimentation animale pour tenter de comprendre la fonction de régions particulières du système nerveux. Toutefois ces méthodes étaient très limitées par leur manque de précision puisqu'elles activent (ou détruisent) tous les neurones à proximité de l'électrode y compris les fibres nerveuses proches. Depuis une vingtaine d'années, les neurosciences ont connu des progrès remarquables avec la découverte de moyens d'activer ou d'inhiber sélectivement des populations identifiées de neurones, par une technique appelée optogénétique²²². Celle-ci consiste à faire exprimer par des méthodes de génie génétique, uniquement dans certains neurones, une protéine dont la stimulation par la lumière active ou inhibe le neurone²²³. Cela peut être réalisé par exemple sur une souris chez laquelle une fibre optique est mise en place dans la région cible et transmet précisément la lumière au moment choisi par l'expérimentateur. Dans une autre méthode complémentaire ayant un principe similaire, appelée chimiogénétique, la protéine exprimée est sensible non pas à la lumière mais à une substance pharmacologique injectée à l'animal. La principale

la fois et mesurer le courant qui la traverse. Une succion plus forte arrache le morceau de membrane et l'électrode mesure alors les courants qui traversent la membrane de la cellule entière ou d'une partie de celle-ci (ex. une dendrite).

²¹⁸ On parle d'enregistrements « multi-unitaires ». Les tétrodes comprenant 4 points de contact permettent de localiser la source de chaque potentiel d'action dans l'espace et les dispositifs les plus récents, utilisant des circuits à base de silicium (*complementary metal-oxide semiconductor* –CMOS- ex. Neuropixels®), contiennent de très grands nombres de points de contact (de l'ordre du millier).

²¹⁹ Coughlin B, Muñoz W, Kfir Y, Young MJ, Meszéna D, Jamali M, Caprara I, Hardstone R, Khanna A, Mustroph ML, Trautmann EM, Windolf C, Varol E, Soper DJ, Stavisky SD, Welkenhuysen M, Dutta B, Shenoy KV, Hochberg LR, Mark Richardson R, Williams ZM, Cash SS, Paulk AC. Modified Neuropixels probes for recording human neurophysiology in the operating room. *Nat Protoc.* 2023 18:2927-53. doi:10.1038/s41596-023-00871-2.

²²⁰ À chaque instant, spontanément ou en réponse à un stimulus, tous les neurones d'une région donnée ne sont pas actifs. Seuls certains d'entre eux ont une activité corrélée. Ce sont ces ensembles neuronaux qui sous-tendent le « traitement de l'information » par le cerveau. Ces ensembles existent au sein de chaque structure et sont connectés à des ensembles d'autres régions, formant des ensembles fonctionnels à grande échelle dont la caractérisation échappe encore largement aux approches expérimentales. Yuste R, Yaksi E. Neuronal ensembles: Building blocks of neural circuits. *Neuron.* 2024 112:875-92. doi:10.1016/j.neuron.2023.12.008.

²²¹ L'interprétation des signaux recueillis chez l'humain par apprentissage automatique se fait « à l'aveugle » par répétition de multiples essais sans possibilité actuellement de compréhension « mécanistique ».

²²² Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de l'optogénétique, soit en identifiant chez des organismes unicellulaires capables de photosynthèse, comme *Chlamydomonas reinhardtii*, des canaux ioniques activables par la lumière, soit en appliquant ces découvertes à l'étude de circuits nerveux chez la drosophile ou chez la souris. Ils étaient 6 à recevoir en 2013 le Brain Prize, une des récompenses les plus prestigieuses en neurosciences pour leurs découvertes ayant permis le développement de l'optogénétique.

²²³ Dugué GP, Tricoire L. Principes et applications de l'optogénétique en neurosciences. *Med Sci (Paris).* 2015 31:291-303. doi:10.1051/medsci/20153103015.

différence est la durée d'action qui peut être très brève avec l'optogénétique et prolongée avec la chimiogénétique. Dans tous les cas l'avantage majeur est de stimuler ou d'inhiber sélectivement une population de neurones dont les caractéristiques sont identiques et ainsi de déterminer leur fonction, par exemple dans le comportement de l'animal. Ces méthodes permettent de provoquer ou de bloquer spécifiquement chez l'animal certains comportements dont la nature et la complexité dépendent des neurones ciblés. Une limite expérimentale et théorique de l'activation ou de l'inhibition d'une population entière de neurones identiques ciblés par l'optogénétique ou la chimiogénétique est que, lors du fonctionnement spontané, normal, seule une partie des neurones d'une même population est activée (ensembles neuronaux). Pour tenter de cibler ces ensembles, d'autres approches ont été développées dans lesquelles des astuces de génétique moléculaire permettent de faire exprimer une protéine marqueur ou une protéine activatrice ou inhibitrice uniquement dans les neurones mis en jeu lors d'une tâche donnée²²⁴. La stimulation lumineuse ou chimique ultérieure permet alors de tester spécifiquement le rôle de cet ensemble et d'explorer par exemple sa contribution à la mémoire de l'apprentissage initial. Les applications humaines de l'optogénétique sont intéressantes²²⁵, mais restent très limitées, notamment du fait des problèmes posés par l'expression de la protéine exogène²²⁶. Des résultats prometteurs ont néanmoins été obtenus dans la rétine (voir 2.2 et 2.3 note 51). Une autre limitation est liée à la méthode de stimulation nécessitant une fibre optique et dont la répétition peut être toxique. Les recherches actuelles ont pour objectif d'améliorer cette tolérance et d'utiliser des stimuli par ultrasons ou infrarouges qui pourraient être appliqués à l'extérieur du crâne. Les travaux chez l'animal ont permis des avancées considérables dans la compréhension anatomo-fonctionnelle du système nerveux et soulignent les difficultés de modifier au long cours, de façon précise et spécifique, l'activité de neurones sélectionnés.

A1-4.2. Autostimulation intracrânienne et circuits de récompense

Un domaine expérimental particulier, dans lequel les travaux ont pendant longtemps reposé sur la stimulation électrique non spécifique, a permis la découverte puis la dissection fonctionnelle des « circuits de récompense ». Ces circuits, essentiels pour l'apprentissage et la survie, ont été très conservés au cours de l'évolution. Ils permettent l'adaptation du comportement à la variabilité de l'environnement, par exemple en optimisant la recherche d'eau ou de nourriture. Ils ont été mis en évidence initialement de façon fortuite, puis par des expériences d'autostimulation intracrânienne²²⁷ chez le rat²²⁸ dans lesquelles l'animal stimule électriquement une région de son cerveau, jusqu'à cesser dans certains cas toute autre activité. Des comportements similaires d'auto-administration sont observés si l'animal a la possibilité de s'auto-injecter l'une des drogues responsables de dépendance chez les humains (drogues addictives). Les recherches ultérieures ont montré un rôle central dans les circuits de récompense des neurones utilisant la dopamine comme neurotransmetteur. Ces neurones ont pour fonction normale de faciliter l'apprentissage de conduites ayant une issue évaluée par le cerveau comme positive (« récompense »). Au-delà de leur rôle physiologique essentiel, le

²²⁴ Ce type de méthode a été développé pour marquer sélectivement les ensembles de neurones activés lors d'une tâche particulière et qui sont susceptibles d'en représenter la trace mémorielle, appelée engramme. L'existence de ces ensembles associés à des mémorisations particulières ou engrammes, avait été postulée au début du XX^e siècle mais leur mise en évidence expérimentale est très récente. Josselyn SA, Tonegawa S. Memory engrams: Recalling the past and imagining the future. *Science*. 2020 367:eaaw4325. doi:10.1126/science.aaw4325.

²²⁵ Lüscher C, Emiliani V, Farahany N, Gittis A, Gradinaru V, High KA, Roska B, Sahel JA, Yizhar O, Zeng H, Deisseroth K. Roadmap for direct and indirect translation of optogenetics into discoveries and therapies for humans. *Nat Neurosci*. 2025 28:2415-31. doi:10.1038/s41593-025-02097-9.

²²⁶ D'une part, il est difficile de faire exprimer spécifiquement un gène dans une population neuronale spécifique chez l'humain et, d'autre part, l'expression prolongée de la protéine exogène peut être toxique et les techniques de génie génétique nécessaires peuvent faire courir des risques notamment cancérologiques.

²²⁷ Olds J, Milner P. Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain. *J Comp Physiol Psychol*. 1954 47:419-27. doi:10.1037/h0058775.

²²⁸ On peut noter que l'autostimulation cérébrale a même été utilisée chez des sujets humains par un acteur ultérieurement très décrié de la neurochirurgie états-unienne (Heath RG. Electrical self-stimulation of the brain in man. *Am J Psychiatry*. 1963 120:571-7. doi:10.1176/ajp.120.6.571).

détournement des « circuits de récompense » et leur dysfonction est à l'origine de toutes les addictions chez les personnes sensibles. En effet les drogues addictives augmentent directement la libération de dopamine par des mécanismes pharmacologiques variés alors qu'elles n'ont aucune valeur « positive » réelle pour l'organisme. Les jeux de hasard ont un effet similaire en activant de façon marquée ces systèmes au cours de l'attente de l'issue incertaine mais possiblement favorable et lors de l'obtention d'un gain s'il survient. Les nombreux travaux expérimentaux montrent la diversité des manipulations pouvant aboutir à la mise en jeu anormale, détournée, des circuits de récompense. La réalité de ce type de risque chez les patients humains, est illustrée dans un contexte médical par la survenue de troubles des conduites impulsives (hypersexualité, addictions, etc.) au cours du traitement de la maladie de Parkinson. Si ces troubles sont surtout liés à l'utilisation de certains médicaments (les agonistes dopaminergiques D2) et peuvent être améliorés par la stimulation cérébrale profonde lorsqu'elle permet d'en diminuer les doses, il existe des cas, moins fréquents, dans lesquels la stimulation les provoque ou les aggrave²²⁹. L'élargissement des indications de la stimulation cérébrale, son ciblage vers un nombre croissant de régions cérébrales, et l'utilisation de divers procédés de stimulation non-invasive, aux effets mal connus, ouvrent des champs d'investigation nouveaux avec aussi bien des possibilités d'amélioration des traitements que des risques de déclenchement de troubles comportementaux. D'une manière générale, le recrutement direct ou indirect, « fortuit », des circuits de récompense ou d'autres circuits essentiels à l'apprentissage ou à la mémoire, serait susceptible d'entraîner des troubles comportementaux ou des distorsions des processus de décision. Les connaissances accumulées en neurosciences expérimentales soulignent que ce type de risque ne peut pas être écarté et qu'une grande prudence doit entourer les applications humaines des neurotechnologies.

²²⁹ Eisinger RS, Ramirez-Zamora A, Carbutaru S, Ptak B, Peng-Chen Z, Okun MS, Gunduz A. Medications, Deep Brain Stimulation, and Other Factors Influencing Impulse Control Disorders in Parkinson's Disease. *Front Neurol.* 2019 10:86. doi:10.3389/fneur.2019.00086.

Annexe 2 Personnes auditionnées

Yohann Attal – MyBrain Technologies

Gérard de Boisboissel – CREC Saint-Cyr Coëtquidan

Anne-Laure Catherinot – Barreau de Bordeaux

Frédéric Dehais – ISAE-SUPAERO

Philippe Domenech – Institut de neuromodulation, hôpital Sainte-Anne

Jean-Louis Dufloux – France Parkinson

Raphaël Gaillard – Institut de neuromodulation, hôpital Sainte-Anne

Anne-Lise Giraud-Mamessier – Institut de l’audition, Institut Pasteur

Hadhemi Kaddour-Robin – Agence de la biomédecine

Jean-Rémi King, CNRS et Meta

Stéphanie Lacour – École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Olivier Locuffier – Human Augmented Brain Systems

Fabien Lotte – INRIA

Luc Mallet – Service de Psychiatrie, hôpital Henri-Mondor

Olivier Oullier – Inclusive Brain

Didier Robiliard – France Parkinson

Sébastien Scanella – ISAE-SUPAERO

Marie Vidailhet – Département des Maladies du Système Nerveux, hôpital Pitié-Salpêtrière

Fabien Wagner – Institut des Maladies Neurodégénératives, CNRS

Annexe 3 Composition du groupe de travail

| | |
|----------------------|--------------------------------|
| Gilles Adda | CNPEN |
| Mounira Amor- Guéret | Ex-CCNE |
| Rachel Bocher | CCNE |
| Laurent Chambaud | CCNE |
| Raja Chatila | CNPEN - CCNEN |
| Hervé Chneiweiss | Invité |
| Alain Claeys | CCNE |
| Michel Clanet | Invité |
| Pierre Delmas-Goyon | Ex-CCNE |
| Claude Delpuech | Ex-CCNE |
| Jean-Antoine Girault | CCNE – co-rapporteur |
| Éric Germain | CNPEN - CCNEN |
| Alexei Grinbaum | CNPEN - CCNEN |
| Jean-Louis Haurie | Ex-CCNE |
| Claude Kirchner | CNPEN - CCNEN |
| Claude Puech | Ex-CCNE |
| Brigitte Serroussi | CCNEN |
| François Stasse | CCNE |
| Catherine Tessier | CNPEN - CCNEN – co-rapporteuse |

Organisation et aide à la rédaction : Anaëlle Martin

Les personnes indiquées ex-CCNE étaient membres du CCNE jusqu'en 2024

Annexe 4 Références bibliographiques

Liste par ordre alphabétique du premier auteur des références mentionnées dans les notes de bas de page.

1. Adrian ED, Matthews BHC. The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man. *Brain*. 1934 57:355–85. doi:10.1093/brain/awp324.
2. Albanese A, Bhatia KP, Fung VSC, Hallett M, Jankovic J, Klein C, Krauss JK, Lang AE, Mink JW, Pandey S, Teller JK, Tijssen MAJ, Vidailhet M, Jinnah HA. Definition and Classification of Dystonia. *Mov Disord*. 2025 40:1248-59. doi:10.1002/mds.30220.
3. Angius L, Pascual-Leone A, Santarnecchi E. Brain stimulation and physical performance. *Prog Brain Res*. 2018 240:317-39. doi:10.1016/bs.pbr.2018.07.010.
4. Attal N, Poindessous-Jazat F, De Chauvigny E, Quesada C, Mhalla A, Ayache SS, Fermanian C, Nizard J, Peyron R, Lefaucheur JP, Bouhassira D. Repetitive transcranial magnetic stimulation for neuropathic pain: a randomized multicentre sham-controlled trial. *Brain*. 2021 144:3328-39. doi:10.1093/brain/awab208.
5. Attali D, Tiennot T, Manuel TJ, Daniel M, Houdouin A, Annic P, Dizeux A, Haroche A, Dadi G, Henensal A, Moyal M, Le Berre A, Paolillo C, Charron S, Debacker C, Lui M, Lekcir S, Mancusi R, Gallarda T, Sharshar T, Sylla K, Oppenheim C, Cachia A, Tanter M, Aubry JF, Plaze M. Deep transcranial ultrasound stimulation using personalized acoustic metamaterials improves treatment-resistant depression in humans. *Brain Stimul*. 2025 18:1004-14. doi:10.1016/j.brs.2025.04.018.
6. Banville H, Benchetrit Y, d'Ascoli S, Rapin J, King JR. Scaling laws for decoding images from brain activity. [ArXiv](#). 2025 (preprint).
7. Barksdale BR, Enten L, DeMarco A, Kline R, Doss MK, Nemeroff CB, Fonzo GA. Low-intensity transcranial focused ultrasound amygdala neuromodulation: a double-blind sham-controlled target engagement study and unblinded single-arm clinical trial. *Mol Psychiatry*. 2025 30:4497-511. doi:10.1038/s41380-025-03033-w.
8. Ben Izhak S, Jacoby N, Diedrich L, Antal A, Lavidor M. Enhanced cognitive performance in older adults through combined cognitive training and transcranial direct current stimulation. *Sci Rep*. 2025 15:24114. doi:10.1038/s41598-025-08322-6.
9. Ben Izhak S, Lavidor M. [The Handbook of Noninvasive Transcranial Brain Stimulation in the Cognitive Domain](#). 2025 Elsevier Inc.
10. Benabid AL, Pollak P, Gross C, Hoffmann D, Benazzouz A, Gao DM, Laurent A, Gentil M, Perret J. Acute and long-term effects of subthalamic nucleus stimulation in Parkinson's disease. *Stereotact Funct Neurosurg*. 1994 62:76-84. doi:10.1159/000098600.
11. Benabid AL, Pollak P, Louveau A, Henry S, de Rougemont J. Combined (thalamotomy and stimulation) stereotactic surgery of the VIM thalamic nucleus for bilateral Parkinson disease. *Appl Neurophysiol*. 1987 50:344-6. doi:10.1159/000100803.
12. Berger H. Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*. 1929 87:527–70.
13. Besnier JM. [« L'avenir du futur n'est pas garanti »](#). Spirale, n°10 - Novembre 2024,
14. Borck C. Between local cultures and national styles: units of analysis in the history of electroencephalography. *C R Biol*. 2006 329:450-9. doi:10.1016/j.crv.2006.03.015.
15. Botvinick M, Cohen J. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 1998, 391:756. doi:10.1038/35784.
16. Brannigan JFM, Fry A, Opie NL, Campbell BCV, Mitchell PJ, Oxley TJ. Endovascular Brain-Computer Interfaces in Poststroke Paralysis. *Stroke*. 2024 55:474-83. doi:10.1161/strokeaha.123.037719.

17. Brigo F, Di Gennaro G, Morano A, Sironi VA, Lorusso L; Study Group on the History of Neurology and of the Study Group on Epilepsy of the Italian Neurological Society. Camillo Negro (1861-1927) and Antonio Carle (1854-1927): Pioneers of non-resective surgical approach to epilepsy treatment. *Epilepsy Behav.* 2021, 125:108360. doi:10.1016/j.yebeh.2021.108360.
18. Brookes MJ, Leggett J, Rea M, Hill RM, Holmes N, Boto E, Bowtell R. Magnetoencephalography with optically pumped magnetometers (OPM-MEG): the next generation of functional neuroimaging. *Trends Neurosci.* 2022, 45:621-634. doi:10.1016/j.tins.2022.05.008.
19. Careil M, Benchetrit Y, King JR. Dynadiff: Single-stage Decoding of Images from Continuously Evolving fMRI. [ArXiv](#). 2025 (preprint).
20. Chatila R « Bioéthique et éthique du numérique : une hybridation paradoxale » in Comité national pilote d'éthique du numérique - Pour une éthique du numérique. Coordonné par Éric Germain, Claude Kirchner, Catherine Tessier, PUF, février 2022, ISBN 978-2-13-083348-2.
21. Chatila R, Kirchner C, Petitjean S, Tessier C- Chapitre 5 « L'intelligence artificielle : quels enjeux éthiques pour la recherche ? » In : L'éthique de la recherche, Quae, à paraître 2026.
22. Chintapalli R, Chang S, Kaprealian T, Savjani R, Tenn S, Bari A. Gamma knife versus linear accelerator thalamotomy for essential tremor and Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis. *J Clin Neurosci.* 2025 133:111050. doi:10.1016/j.jocn.2025.111050.
23. Choe J, Coffman BA, Bergstedt DT, Ziegler MD, Phillips ME. Transcranial Direct Current Stimulation Modulates Neuronal Activity and Learning in Pilot Training. *Front Hum Neurosci.* 2016 0:34. doi:10.3389/fnhum.2016.00034.
24. Clair AH, Haynes W, Mallet L. Recent advances in deep brain stimulation in psychiatric disorders. *F1000Res.* 2018, 7:F1000 Faculty Rev-699. doi:10.12688/f1000research.14187.1.
25. Conelea CA, Lieske A. Neurodevelopmental considerations for transcranial magnetic stimulation trials in youth. *Neuropsychopharmacology.* 2026 51:219-29. doi:10.1038/s41386-025-02225-w.
26. Coughlin B, Muñoz W, Kfir Y, Young MJ, Meszéna D, Jamali M, Caprara I, Hardstone R, Khanna A, Mustroph ML, Trautmann EM, Windolf C, Varol E, Soper DJ, Stavisky SD, Welkenhuysen M, Dutta B, Shenoy KV, Hochberg LR, Mark Richardson R, Williams ZM, Cash SS, Paulk AC. Modified Neuropixels probes for recording human neurophysiology in the operating room. *Nat Protoc.* 2023 18:2927-53. doi:10.1038/s41596-023-00871-2.
27. de Brito MA, Fernandes JR, Esteves NS, Müller VT, Alexandria DB, Pérez DIV, Slimani M, Brito CJ, Bragazzi NL, Miarka B. The Effect of Neurofeedback on the Reaction Time and Cognitive Performance of Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Hum Neurosci.* 2022 16:868450. doi:10.3389/fnhum.2022.868450.
28. Dehais F, Ladouce S, Darmet L, Nong TV, Ferraro G, Torre Tresols J, Velut S, Labedan P. Dual Passive Reactive Brain-Computer Interface: A Novel Approach to Human-Machine Symbiosis. *Front Neuroergon.* 2022 3:824780. doi:10.3389/fnrgo.2022.824780.
29. Deuschl G, Antonini A, Costa J, Śmiłowska K, Berg D, Corvol JC, Fabbrini G, Ferreira J, Foltynie T, Mir P, Schrag A, Seppi K, Taba P, Ruzicka E, Selikhova M, Henschke N, Villanueva G, Moro E. European Academy of Neurology/Movement Disorder Society-European Section Guideline on the Treatment of Parkinson's Disease: I. Invasive Therapies. *Mov Disord.* 2022 37:1360-74. doi:10.1002/mds.29066.
30. DiLuca M, Olesen J. The cost of brain diseases: a burden or a challenge? *Neuron.* 2014 82:1205-8. doi:10.1016/j.neuron.2014.05.044.
31. Douibi K, Le Bars S, Lemontey A, Nag L, Balp R, Breda G. Toward EEG-Based BCI Applications for Industry 4.0: Challenges and Possible Applications. *Front Hum Neurosci.* 2021 15:705064. doi:10.3389/fnhum.2021.705064.

32. Drew L. Neuralink brain chip: advance sparks safety and secrecy concerns. *Nature*. 2024 627:19. doi:10.1038/d41586-024-00550-6.
33. Dugué GP, Tricoire L. Principes et applications de l'optogénétique en neurosciences. *Med Sci (Paris)*. 2015 31:291-303. doi:10.1051/medsci/20153103015.
34. Eisinger RS, Ramirez-Zamora A, Carbanaru S, Ptak B, Peng-Chen Z, Okun MS, Gunduz A. Medications, Deep Brain Stimulation, and Other Factors Influencing Impulse Control Disorders in Parkinson's Disease. *Front Neurol*. 2019 Feb 26;10:86. doi:10.3389/fneur.2019.00086.
35. Eliufoo E, Kamuyalo C, Yusheng T, Nyundo A, Yamin L. The safety profile of subthalamic nucleus and globus pallidus internus deep brain stimulation for Parkinson's diseases: A systematic review of perioperative complications and psychological impacts. *Langenbecks Arch Surg*. 2025, 410(1):131. doi:10.1007/s00423-025-03674-z.
36. Erro R, Fasano A, Barone P, Bhatia KP. Milestones in Tremor Research: 10 Years Later. *Mov Disord Clin Pract*. 2022, 9:429-435. doi:10.1002/mdc3.13418.
37. Esfandiari H, Troxler P, Hodel S, Suter D, Farshad M; Collaboration Group; Fürnstahl P. Introducing a brain-computer interface to facilitate intraoperative medical imaging control - a feasibility study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022 23:701. doi:10.1186/s12891-022-05384-9.
38. Garcia A, Haleem A, Poe S, Gosh D, Christian Brown M, Herrmann BS, Lee DJ. Auditory Brainstem Implant Outcomes in Tumor and Nontumor Patients: A Systematic Review. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2024 170:1648-58. doi:10.1002/ohn.662.
39. Gazzaniga M « Le libre-arbitre et la science du cerveau », traduit de l'anglais, éditions Odile Jacob, ISBN : 978-2-7381-2916-1.
40. Gilbert F, Russo I. Neurorights: The Land of Speculative Ethics and Alarming Claims? *AJOB Neurosci*. 2024 15:113-5. doi:10.1080/21507740.2024.2328244.
41. Global Neuroethics Summit Delegates; Rommelfanger KS, Jeong SJ, Ema A, Fukushi T, Kasai K, Ramos KM, Salles A, Singh I. Neuroethics Questions to Guide Ethical Research in the International Brain Initiatives. *Neuron*. 2018 100:19-36. doi:10.1016/j.neuron.2018.09.021.
42. Goering S, Klein E, Specker Sullivan L, Wexler A, Agüera Y Arcas B, Bi G, Carmena JM, Fins JJ, Friesen P, Gallant J, Huggins JE, Kellmeyer P, Marblestone A, Mitchell C, Parens E, Pham M, Rubel A, Sadato N, Teicher M, Wasserman D, Whittaker M, Wolpaw J, Yuste R. Recommendations for Responsible Development and Application of Neurotechnologies. *Neuroethics*. 2021 14:365-386. doi:10.1007/s12152-021-09468-6.
43. Hariz MI, Blomstedt P, Zrinzo L. Deep brain stimulation between 1947 and 1987: the untold story. *Neurosurg Focus*. 2010, 29:E1. doi:10.3171/2010.4.FOCUS10106.
44. Heath RG. Electrical self-stimulation of the brain in man. *Am J Psychiatry*. 1963, 120:571-7. doi:10.1176/ajp.120.6.571.
45. Holz FG, Le Mer Y, Muqit MMK, Hattenbach LO, Cusumano A, Grisanti S, Kodjikian L, Pileri MA, Matonti F, Souied E, Stanzel BV, Szurman P, Weber M, Bartz-Schmidt KU, Eter N, Delyfer MN, Girmens JF, van Overdam KA, Wolf A, Hornig R, Corazzol M, Brodie F, Olmos de Koo L, Palanker D, Sahel JA. Subretinal Photovoltaic Implant to Restore Vision in Geographic Atrophy Due to AMD. *N Engl J Med*. 2026 394:232-242. doi:10.1056/NEJMoa2501396.
46. Horikawa T. Mind captioning: Evolving descriptive text of mental content from human brain activity. *Sci Adv*. 2025 11(45):eadw1464. doi:10.1126/sciadv.adw1464.
47. Hottois Gilbert « Philosophie et idéologies post/transhumanistes » Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 2017, ISBN 978-2-7116-2785-1
48. Ienca M, Andorno R. Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology. *Life Sci Soc Policy*. 2017 13:5. doi:10.1186/s40504-017-0050-1.

49. Jäncke L, Valizadeh SA. Identification of individual subjects based on neuroanatomical measures obtained 7 years earlier. *Eur J Neurosci.* 2022 56:4642-52. doi:10.1111/ejn.15770.
50. Josselyn SA, Tonegawa S. Memory engrams: Recalling the past and imagining the future. *Science.* 2020, 367:eaaw4325. doi:10.1126/science.aaw4325.
51. Jung B, Yang C, Lee SH. Vagus nerves stimulation: clinical implication and practical issue as a neuropsychiatric treatment. *Clin Psychopharmacol Neurosci.* 2024 22:13-22. doi:10.9758/cpn.23.1101.
52. Kaifosh P, Reardon TR; CTRL-labs at Reality Labs. A generic non-invasive neuromotor interface for human-computer interaction. *Nature.* 2025 645:702-11. doi:10.1038/s41586-025-09255-w.
53. Kan RLD, Padberg F, Giron CG, Lin TTZ, Zhang BBB, Brunoni AR, Kranz GS. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex on symptom domains in neuropsychiatric disorders: a systematic review and cross-diagnostic meta-analysis. *Lancet Psychiatry.* 2023 10:252-9. doi:10.1016/S2215-0366(23)00026-3.
54. Kardan O, Kaplan S, Wheelock MD, Feczko E, Day TKM, Miranda-Domínguez Ó, Meyer D, Eggebrecht AT, Moore LA, Sung S, Chamberlain TA, Earl E, Snider K, Graham A, Berman MG, Uğurbil K, Yacoub E, Elison JT, Smyser CD, Fair DA, Rosenberg MD. Resting-state functional connectivity identifies individuals and predicts age in 8-to-26-month-olds. *Dev Cogn Neurosci.* 2022 56:101123. doi:10.1016/j.dcn.2022.101123.
55. Khan S, Kallis L, Mee H, El Hadwe S, Barone D, Hutchinson P, Koliass A. Invasive Brain-Computer Interface for Communication: A Scoping Review. *Brain Sci.* 2025, 15:336. doi:10.3390/brainsci15040336.
56. Kim JH, De Asis-Cruz J, Limperopoulos C. Separating group- and individual-level brain signatures in the newborn functional connectome: A deep learning approach. *Neuroimage.* 2024 299:120806. doi:10.1016/j.neuroimage.2024.120806.
57. Knotkova H, Hamani C, Sivanesan E, Le Beuffe MFE, Moon JY, Cohen SP, Huntoon MA. Neuromodulation for chronic pain. *Lancet.* 2021 397:2111-24. doi:10.1016/S0140-6736(21)00794-7.
58. Ko TH, Lee YH, Chan L, Tsai K, Hong CT, Lo WL. Magnetic Resonance-Guided focused ultrasound surgery for Parkinson's disease: A mini-review and comparison between deep brain stimulation. *Parkinsonism Relat Disord.* 2023, 111:105431. doi:10.1016/j.parkreldis.2023.105431.
59. Kolb B, Harker A, Gibb R. Principles of plasticity in the developing brain. *Dev Med Child Neurol.* 2017 59:1218-23. doi:10.1111/dmcn.13546.
60. Krack P, Volkmann J, Tinkhauser G, Deuschl G. Deep Brain Stimulation in Movement Disorders: From Experimental Surgery to Evidence-Based Therapy. *Mov Disord.* 2019 34:1795-810. doi:10.1002/mds.27860.
61. Kunz EM, Abramovich Krasa B, Kamdar F, Avansino DT, Hahn N, Yoon S, Singh A, Nason-Tomaszewski SR, Card NS, Jude JJ, Jacques BG, Bechefskey PH, Iacobacci C, Hochberg LR, Rubin DB, Williams ZM, Brandman DM, Stavisky SD, AuYong N, Pandarinath C, Druckmann S, Henderson JM, Willett FR. Inner speech in motor cortex and implications for speech neuroprostheses. *Cell.* 2025 188:4658-73. doi:10.1016/j.cell.2025.06.015.
62. Lackner JR. Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. *Brain.* 1988 111:281-97. doi:10.1093/brain/111.2.281.
63. Lazarou I, Nikolopoulos S, Petrantonakis PC, Kompatsiaris I, Tsolaki M. EEG-Based Brain-Computer Interfaces for Communication and Rehabilitation of People with Motor Impairment: A Novel Approach of the 21st Century. *Front Hum Neurosci.* 2018 12:14. doi:10.3389/fnhum.2018.00014.
64. Leuthardt EC, Moran DW, Mullen TR. Defining Surgical Terminology and Risk for Brain Computer Interface Technologies. *Front Neurosci.* 2021 15:599549. doi:10.3389/fnins.2021.599549.

65. Lévy J, Zhang M, Pinet S, Rapin J, Banville H, d'Ascoli S, King JR. Brain-to-Text Decoding: A Non-invasive Approach via Typing. [ArXiv](#). 2025 (preprint).
66. Li S, Wang H, Chen X, Wu D. Multimodal Brain-Computer Interfaces: AI-powered Decoding Methodologies. [ArXiv](#). 2025 (preprint).
67. Liang X, Wei X, Huang Y, Li J, Feng H, Fan J, Zhang L, Wang Z, Zhao X, Pan W, Liu R. Comparative efficacy of non-invasive brain stimulation for attention-deficit/hyperactivity disorder: a systematic review and network meta-analysis. *Front Neurol*. 2025 16:1650154. doi:10.3389/fneur.2025.1650154.
68. Libet B, Gleason CA, Wright EW, Pearl DK. Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain*. 1983 106:623-42. doi:10.1093/brain/106.3.623.
69. Littlejohn KT, Cho CJ, Liu JR, Silva AB, Yu B, Anderson VR, Kurtz-Miott CM, Brosler S, Kashyap AP, Hallinan IP, Shah A, Tu-Chan A, Ganguly K, Moses DA, Chang EF, Anumanchipalli GK. A streaming brain-to-voice neuroprosthesis to restore naturalistic communication. *Nat Neurosci*. 2025, 28:902-912. doi:10.1038/s41593-025-01905-6.
70. Liu A, Vöröslakos M, Kronberg G, Henin S, Krause MR, Huang Y, Opitz A, Mehta A, Pack CC, Krekelberg B, Berényi A, Parra LC, Melloni L, Devinsky O, Buzsáki G. Immediate neurophysiological effects of transcranial electrical stimulation. *Nat Commun*. 2018 9:5092. doi:10.1038/s41467-018-07233-7.
71. Lu H, Zhang Y, Huang P, Zhang Y, Cheng S, Zhu X. Transcranial electrical stimulation offers the possibility of improving teamwork among military pilots: a review. *Front Neurosci*. 2022 16:931265. doi:10.3389/fnins.2022.931265.
72. Lüscher C, Emiliani V, Farahany N, Gittis A, Gradinaru V, High KA, Roska B, Sahel JA, Yizhar O, Zeng H, Deisseroth K. Roadmap for direct and indirect translation of optogenetics into discoveries and therapies for humans. *Nat Neurosci*. 2025 28:2415-31. doi:10.1038/s41593-025-02097-9.
73. Mahoney JJ 3rd, Koch-Gallup N, Scarisbrick DM, Berry JH, Rezai AR. Deep brain stimulation for psychiatric disorders and behavioral/cognitive-related indications: Review of the literature and implications for treatment. *J Neurol Sci*. 2022 437:120253. doi:10.1016/j.jns.2022.120253.
74. Malkani RG, Zee PC. Brain Stimulation for Improving Sleep and Memory. *Sleep Med Clin*. 2022 17:505-21. doi:10.1016/j.jsmc.2022.06.013.
75. Mallet L, Polosan M, Jaafari N, Baup N, Welter ML, Fontaine D, du Montcel ST, Yelnik J, Chéreau I, Arbus C, Raoul S, Aouizerate B, Damier P, Chabardès S, Czernecki V, Ardouin C, Krebs MO, Bardinet E, Chaynes P, Burbaud P, Cornu P, Derost P, Bougerol T, Bataille B, Mattei V, Dormont D, Devaux B, Vérin M, Houeto JL, Pollak P, Benabid AL, Agid Y, Krack P, Millet B, Pelissolo A; STOC Study Group. Subthalamic nucleus stimulation in severe obsessive-compulsive disorder. *N Engl J Med*. 2008 359:2121-34. doi:10.1056/NEJMoa0708514.
76. Mar-Barrutia L, Real E, Segalás C, Bertolín S, Menchón JM, Alonso P. Deep brain stimulation for obsessive-compulsive disorder: A systematic review of worldwide experience after 20 years. *World J Psychiatry*. 2021, 11:659-80. doi:10.5498/wjp.v11.i9.659.
77. Mazoyer B. In memoriam: Jean Talairach (1911-2007): a life in stereotaxy. *Hum Brain Mapp*. 2008 29:250-2. doi:10.1002/hbm.20473.
78. Metzger SL, Littlejohn KT, Silva AB, Moses DA, Seaton MP, Wang R, Dougherty ME, Liu JR, Wu P, Berger MA, Zhuravleva I, Tu-Chan A, Ganguly K, Anumanchipalli GK, Chang EF. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control. *Nature*. 2023 620:1037-46. doi:10.1038/s41586-023-06443-4.
79. Milekovic T, Moraud EM, Macellari N, Moerman C, Raschellà F, Sun S, Perich MG, Varescon C, Demesmaeker R, Bruel A, Bole-Feysot LN, Schiavone G, Pirondini E, YunLong C, Hao L, Galvez A, Hernandez-Charpak SD, Dumont G, Ravier J, Le Goff-Mignardot CG, Mignardot JB, Carparelli G, Harte C,

- Hankov N, Aureli V, Watrin A, Lambert H, Borton D, Laurens J, Vollenweider I, Borgognon S, Bourre F, Goillandeau M, Ko WKD, Petit L, Li Q, Buschman R, Buse N, Yaroshinsky M, Ledoux JB, Becce F, Jimenez MC, Bally JF, Denison T, Guehl D, Ijspeert A, Capogrosso M, Squair JW, Asboth L, Starr PA, Wang DD, Lacour SP, Micera S, Qin C, Bloch J, Bezard E, Courtine G. A spinal cord neuroprosthesis for locomotor deficits due to Parkinson's disease. *Nat Med.* 2023 29:2854-65. doi:10.1038/s41591-023-02584-1.
80. Miranda RA, Casebeer WD, Hein AM, Judy JW, Krotkov EP, Laabs TL, Manzo JE, Pankratz KG, Pratt GA, Sanchez JC, Weber DJ, Wheeler TL, Ling GS. DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies. *J Neurosci Methods.* 2015 244:52-67. doi:10.1016/j.jneumeth.2014.07.019.
 81. Misra J, Surampudi SG, Venkatesh M, Limbachia C, Jaja J, Pessoa L. Learning brain dynamics for decoding and predicting individual differences. *PLoS Comput Biol.* 2021 17:e1008943. doi:10.1371/journal.pcbi.1008943.
 82. Missa JN, La psychochirurgie : histoire d'une pratique expérimentale. *Médecine/Sciences Partie 1, 11:1370-4; Partie 2, 13:1521-4.*
 83. Mitchell P, Lee SCM, Yoo PE, Morokoff A, Sharma RP, Williams DL, Maclsaac C, Howard ME, Irving L, Vrljic I, Williams C, Bush S, Balabanski AH, Drummond KJ, Desmond P, Weber D, Denison T, Mathers S, O'Brien TJ, Mocco J, Grayden DB, Liebeskind DS, Opie NL, Oxley TJ, Campbell BCV. Assessment of Safety of a Fully Implanted Endovascular Brain-Computer Interface for Severe Paralysis in 4 Patients: The Stentrode with Thought-Controlled Digital Switch (SWITCH) Study. *JAMA Neurol.* 2023 80:270-8. doi:10.1001/jamaneurol.2022.4847
 84. Nason SR, Mender MJ, Letner JG, Chestek CA, Patil PG. Restoring upper extremity function with brain-machine interfaces. *Int Rev Neurobiol.* 2021 159:153-86. doi:10.1016/bs.irn.2021.06.001.
 85. Nassery A, Palmese CA, Sarva H, Groves M, Miravite J, Kopell BH. Psychiatric and Cognitive Effects of Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2016 16:87. doi:10.1007/s11910-016-0690-1.
 86. Nejati V, Ghafari F, Hosseini K, Behroozmand R. The effectiveness of transcranial electrical stimulation in individuals with specific learning disorder (SLD): systematic review and transfer analysis. *J Neurodev Disord.* 2025 17:66. doi:10.1186/s11689-025-09623-7.
 87. Nejati V, Vaziri Z, Antal A, Antonenko D, Behroozmand R, Bestmann S, Brunelin J, Brunoni AR, Carvalho S, Davis NJ, Enticott PG, Fallgatter AJ, Ferrucci R, Fitzgerald PB, Hamada M, Hamilton RH, Hoy KE, Jaberzadeh S, Jamil A, Cohen Kadosh R, Krekelberg B, Laureys S, Romero Lauro LJ, Loo CK, Martin D, Martinotti G, Mondino M, Oliviero A, Pellicciari MC, Plewnia C, Pobric G, De Raedt R, Razza LB, Rocchi L, Salehinejad MA, Khorrami AS, Schecklmann M, Siebner HR, Taylor SF, Vanderhasselt MA, Vanneste S, Vicario CM, Woods AJ, Ziemann U, Nitsche MA. Report Approval for Transcranial Electrical Stimulation (RATES): expert recommendation based on a Delphi consensus study. *Nat Protoc.* 2025 doi:10.1038/s41596-025-01259-0.
 88. Nougères AB. [Fondements et principes de la réglementation des neurotechnologies et du traitement des neurodonnées du point de vue du droit à la vie privée.](#) Nations Unies, Assemblée générale, 2025.
 89. [OECD Neurotechnology and society strengthening responsible innovation in brain science.](#) OECD Science, technology and innovation policy papers. November 2017 n°46.
 90. Okun MS, Marjenin T, Ekanayake J, Gilbert F, Doherty SP, Pilkington J, French J, Kubu C, Lázaro-Muñoz G, Denison T, Giordano J. Definition of Implanted Neurological Device Abandonment: A Systematic Review and Consensus Statement. *JAMA Netw Open.* 2024 7:e248654. doi:10.1001/jamanetworkopen.2024.8654.
 91. Olds J, Milner P. Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain. *J Comp Physiol Psychol.* 1954 47:419-27. doi:10.1037/h0058775.

92. O'Neal CM, Baker CM, Glenn CA, Conner AK, Sughrue ME. Dr. Robert G. Heath: a controversial figure in the history of deep brain stimulation. *Neurosurg Focus*. 2017 43:E12. doi:10.3171/2017.6.FOCUS17252.
93. Pascual-Leone A. The brain that plays music and is changed by it. *Ann N Y Acad Sci*. 2001 930:315-29. doi:10.1111/j.1749-6632.2001.tb05741.x.
94. Payer L. *Disease-mongers: how doctors, drug companies, and insurers are making you feel sick*. 1992 New York: J. Wiley. ISBN 978-0471543855.
95. Pei X, Xu G, Zhou Y, Tao L, Cui X, Wang Z, Xu B, Wang AL, Zhao X, Dong H, An Y, Cao Y, Li R, Hu H, Yu Y. A simultaneous electroencephalography and eye-tracking dataset in elite athletes during alertness and concentration tasks. *Sci Data*. 2022 9:465. doi:10.1038/s41597-022-01575-0.
96. Perreault I. Chapitre 1 Psychochirurgie et homosexualité. Quelques cas à l'Hôpital Saint-Jean-de-Dieu à la mi-XXe siècle. Isabelle, in [Régulations sociales des minorités sexuelles](#). Presses de l'Université du Québec, 2011.
97. Pessiglione « Les vacances de Momo Sapiens » de Mathias Pessiglione. Editions Odile Jacob, mars 2021, ISBN 9782738151742.
98. Pollak P, Burkhard P, Vingerhoets F. Stimulation cérébrale profonde : passé, présent et avenir. *Rev Med Suisse*. 2015 11:958-61. doi:10.53738/REVMED.2015.11.472.0958.
99. Pomes MV, D'Urso G, Bove I, Cavallo LM, Della Ragione L, Palmiero C, Perrotta F, Esposito F, Somma T. Psychiatric Outcomes of Subthalamic Nucleus Deep Brain Stimulation: A Systematic Review of Short- and Long-Term Effects. *Brain Sci*. 2025 15:566. doi:10.3390/brainsci15060566.
100. Poo MM, Du JL, Ip NY, Xiong ZQ, Xu B, Tan T. China Brain Project: Basic Neuroscience, Brain Diseases, and Brain-Inspired Computing. *Neuron*. 2016 92:591-6. doi:10.1016/j.neuron.2016.10.050.
101. Qian Y, Liu C, Yu P, Ran X, Li S, Yang Q, Liu Y, Xia L, Wang Y, Qi J, Zhou E, Lu J, Li Y, Tao TH, Zhou Z, Wu J. Real-time decoding of full-spectrum Chinese using brain-computer interface. *Sci Adv*. 2025, 11:eadz9968. doi:10.1126/sciadv.adz9968.
102. Rainey S, Maslen H, Mégevand P, Arnal LH, Fournier E, Yvert B. Neuroprosthetic Speech: The Ethical Significance of Accuracy, Control and Pragmatics. *Camb Q Healthc Ethics*. 2019 28:657-70. doi:10.1017/S0963180119000604.
103. Ramachandran VS, Blakeslee S « Le Fantôme intérieur », éditions Odile Jacob, mars 2002, ISBN: 2-7381-1191-2.
104. Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D, Cobb S. Touching the phantom limb. *Nature*. 1995 377:489-90. doi:10.1038/377489a0.
105. Rodriguez-Oroz MC, Martínez-Fernández R, Lipsman N, Horisawa S, Moro E. Bilateral Lesions in Parkinson's Disease: Gaps and Controversies. *Mov Disord*. 2025 40:231-240. doi:10.1002/mds.30090.
106. Rodriguez-Oroz MC, Obeso JA, Lang AE, Houeto JL, Pollak P, Rehncrona S, Kulisevsky J, Albanese A, Volkmann J, Hariz MI, Quinn NP, Speelman JD, Guridi J, Zamarbide I, Gironell A, Molet J, Pascual-Sedano B, Pidoux B, Bonnet AM, Agid Y, Xie J, Benabid AL, Lozano AM, Saint-Cyr J, Romito L, Contarino MF, Scerrati M, Fraix V, Van Blercom N. *Brain*. 2005 128:2240-9. doi:10.1093/brain/awh571.
107. Rübél O, Tritt A, Ly R, Dichter BK, Ghosh S, Niu L, Baker P, Soltesz I, Ng L, Svoboda K, Frank L, Bouchard KE. The Neurodata Without Borders ecosystem for neurophysiological data science. *Elife*. 2022 11:e78362. doi:10.7554/eLife.78362.
108. Ruiz S, Valera L, Ramos P, Sitaram R. Neurorights in the Constitution: from neurotechnology to ethics and politics. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2024 379:20230098. doi:10.1098/rstb.2023.0098.
109. Sacks O. « L'homme qui prenait sa femme pour un chapeau », traduit de l'anglais, éditions du Seuil, ISBN 10: 2020146304.

110. Sahel JA, Boulanger-Scemama E, Pagot C, Arleo A, Galluppi F, Martel JN, Esposti SD, Delaux A, de Saint Aubert JB, de Montleau C, Gutman E, Audo I, Duebel J, Picaud S, Dalkara D, Blouin L, Tiel M, Roska B. Partial recovery of visual function in a blind patient after optogenetic therapy. *Nat Med.* 2021 27:1223-9. doi:10.1038/s41591-021-01351-4.
111. Sandrini M, Manenti R, Gobbi E, Pagnoni I, Geviti A, Alaimo C, Campana E, Binetti G, Cotelli M. Cognitive reserve predicts episodic memory enhancement induced by transcranial direct current stimulation in healthy older adults. *Sci Rep.* 2024 14:4879. doi:10.1038/s41598-024-53507-0.
112. Sankary LR, Zelinsky M, Machado A, Rush T, White A, Ford PJ. Exit from Brain Device Research: A Modified Grounded Theory Study of Researcher Obligations and Participant Experiences. *AJOB Neurosci.* 2022 13:215-26. doi:10.1080/21507740.2021.1938293.
113. Savelon ECJ, Jordan HT, Stinear CM, Byblow WD. Noninvasive brain stimulation to improve motor outcomes after stroke. *Curr Opin Neurol.* 2024 37:621-8. doi:10.1097/WCO.0000000000001313.
114. Scangos KW, Khambhati AN, Daly PM, Makhoul GS, Sugrue LP, Zamanian H, Liu TX, Rao VR, Sellers KK, Dawes HE, Starr PA, Krystal AD, Chang EF. Closed-loop neuromodulation in an individual with treatment-resistant depression. *Nat Med.* 2021 27:1696-700. doi:10.1038/s41591-021-01480-w.
115. Serhan Y, Darawshy S, Wei W, Margulies DS, Nanning KH, Ovadia-Caro S. Individual uniqueness of connectivity gradients is driven by the complexity of the embedded networks and their dispersion. *Brain Struct Funct.* 2025 230:110. doi:10.1007/s00429-025-02976-8.
116. Shapson-Coe A, Januszewski M, Berger DR, Pope A, Wu Y, Blakely T, Schalek RL, Li PH, Wang S, Maitin-Shepard J, Karlupia N, Dorkenwald S, Sjostedt E, Leavitt L, Lee D, Troidl J, Collman F, Bailey L, Fitzmaurice A, Kar R, Field B, Wu H, Wagner-Carena J, Aley D, Lau J, Lin Z, Wei D, Pfister H, Peleg A, Jain V, Lichtman JW. A petavoxel fragment of human cerebral cortex reconstructed at nanoscale resolution. *Science.* 2024, 384:eadk4858. doi:10.1126/science.adk4858.
117. Shiramba A, Lane S, Ray N, Gilbertson T, Srinivasaiah R, Panicker J, Radon M, Osman-Farah J, Macerollo A. Efficacy and Safety of Magnetic Resonance-Guided Focused Ultrasound Thalamotomy in Essential Tremor: A Systematic Review and Metanalysis. *Mov Disord.* 2025 40:1020-33. doi:10.1002/mds.30188.
118. Shon YM, Park HR, Lee S. Deep Brain Stimulation Therapy for Drug-Resistant Epilepsy: Present and Future Perspectives. *J Epilepsy Res.* 2025 15:33-41. doi:10.14581/jer.25004.
119. Silva AB, Littlejohn KT, Liu JR, Moses DA, Chang EF. The speech neuroprosthesis. *Nat Rev Neurosci.* 2024 25:473-92. doi:10.1038/s41583-024-00819-9.
120. Somerville LH. Searching for Signatures of Brain Maturity: What Are We Searching For? *Neuron.* 2016 92:1164-7. doi:10.1016/j.neuron.2016.10.059.
121. Soon CS, Brass M, Heinze HJ, Haynes JD. Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nat Neurosci.* 2008, 11:543-5. doi:10.1038/nn.2112.
122. Spiegel EA, Wycis HT, Marks M, Lee AJ. Stereotaxic Apparatus for Operations on the Human Brain. *Science.* 1947 106:349-50. doi:10.1126/science.106.2754.349.
123. Steeg K, Bohrer E, Schäfer SB, Vu VD, Scherberich J, Windfelder AG, Krombach GA. Re-identification of anonymised MRI head images with publicly available software: investigation of the current risk to patient privacy. *The Lancet, eClinical Medicine.* 2024 78:102930. doi:10.1016/j.eclinm.2024.102930.
124. Tamnes CK, Ostby Y, Fjell AM, Westlye LT, Due-Tønnessen P, Walhovd KB. Brain maturation in adolescence and young adulthood: regional age-related changes in cortical thickness and white matter volume and microstructure. *Cereb Cortex.* 2010 20:534-48. doi:10.1093/cercor/bhp118.
125. Tang J, LeBel A, Jain S, Huth AG. Semantic reconstruction of continuous language from non-invasive brain recordings. *Nat Neurosci.* 2023, 26:858-866. doi:10.1038/s41593-023-01304-9.

126. Treffert DA. The savant syndrome: an extraordinary condition. A synopsis: past, present, future. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2009, 364:1351-7. doi:10.1098/rstb.2008.0326.
127. Valle G, Alamri AH, Downey JE, Lienkämper R, Jordan PM, Sobinov AR, Endsley LJ, Prasad D, Boninger ML, Collinger JL, Warnke PC, Hatsopoulos NG, Miller LE, Gaunt RA, Greenspon CM, Bensmaia SJ. Tactile edges and motion via patterned microstimulation of the human somatosensory cortex. *Science.* 2025, 387:315-322. doi:10.1126/science.adq5978.
128. Van Stuijvenberg OC, Bredenoord AL, Broekman MLD, Jongsma KR. Leaving Users in the Dark: A Call to Define Responsibilities toward Users of Neural Implanted Devices. *AJOB Neurosci.* 2022, 13:233-6. doi:10.1080/21507740.2022.2126545.
129. van Weelden E, van Beek CWE, Alimardani M, Wiltshire TJ, Ledegang WD, Groen EL, Louwerse MM. A Passive Brain-Computer Interface for Predicting Pilot Workload in Virtual Reality Flight Training. 2024 IEEE 4th International Conference on Human-Machine Systems, ICHMS 2024. doi:10.1109/ichms59971.2024.10555679.
130. Venkatesh M, Jaja J, Pessoa L. Comparing functional connectivity matrices: A geometry-aware approach applied to participant identification. *Neuroimage.* 2020 207:116398. doi:10.1016/j.neuroimage.2019.116398.
131. Vidal C. [La convergence des neurotechnologies et du numérique dans l'éducation : Enjeux éthiques et sociétaux.](#) 2024, pp.1-35. ffinserm-04751560 Note pour le Comité d'éthique de l'INSERM.
132. Vidal JJ. Toward direct brain-computer communication. *Annu Rev Biophys Bioeng.* 1973 2:157-80. doi:10.1146/annurev.bb.02.060173.001105.
133. Visser-Vandewalle V, Andrade P, Mosley PE, Greenberg BD, Schuurman R, McLaughlin NC, Voon V, Krack P, Foote KD, Mayberg HS, Figue M, Kopell BH, Polosan M, Joyce EM, Chabardes S, Matthews K, Baldermann JC, Tyagi H, Holtzheimer PE, Bervoets C, Hamani C, Karachi C, Denys D, Zrinzo L, Blomstedt P, Naesström M, Abosch A, Rasmussen S, Coenen VA, Schlaepfer TE, Dougherty DD, Domenech P, Silburn P, Giordano J, Lozano AM, Sheth SA, Coyne T, Kuhn J, Mallet L, Nuttin B, Hariz M, Okun MS. Deep brain stimulation for obsessive-compulsive disorder: a crisis of access. *Nat Med.* 2022 28:1529-32. doi:10.1038/s41591-022-01879-z.
134. Wagner FB, Mignardot JB, Le Goff-Mignardot CG, Demesmaeker R, Komi S, Capogrosso M, Rowald A, Seáñez I, Caban M, Pirondini E, Vat M, McCracken LA, Heimgartner R, Fodor I, Watrin A, Seguin P, Paoles E, Van Den Keybus K, Eberle G, Schurch B, Pralong E, Becce F, Prior J, Buse N, Buschman R, Neufeld E, Kuster N, Carda S, von Zitzewitz J, Delattre V, Denison T, Lambert H, Minassian K, Bloch J, Courtine G. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *Nature.* 2018 563:65-71. doi:10.1038/s41586-018-0649-2.
135. Wairagkar M, Card NS, Singer-Clark T, Hou X, Iacobacci C, Miller LM, Hochberg LR, Brandman DM, Stavisky SD. An instantaneous voice-synthesis neuroprosthesis. *Nature.* 2025 644:145-52. doi:10.1038/s41586-025-09127-3.
136. Weiner RD, Reti IM. Key updates in the clinical application of electroconvulsive therapy. *Int Rev Psychiatry.* 2017 29:54-62. doi:10.1080/09540261.2017.1309362.
137. Wu S, Ramdas A, Wehbe L. Brainprints: identifying individuals from magnetoencephalograms. *Commun Biol.* 2022 5:852. doi:10.1038/s42003-022-03727-9.
138. Yadav H, Maini S. Decoding brain signals: A comprehensive review of EEG-Based BCI paradigms, signal processing and applications. *Comput Biol Med.* 2025, 196:110937. doi:10.1016/j.combiomed.2025.110937.
139. Yang YY, Hwang AH, Wu CT, Huang TR. Person-identifying brainprints are stably embedded in EEG mindprints. *Sci Rep.* 2022 12:17031. doi:10.1038/s41598-022-21384-0.
140. Yon A. « Mon vrai nom est Élisabeth ». 2025. Éditions du sous-sol, Paris. ISBN 13 978-2-36468-957-2.

141. Yong E. Out-of-body experience: Master of illusion. News feature. *Nature*. 2011 480:168–70. doi:10.1038/480168a.
142. Yuste R, Cossart R, Yaksi E. Neuronal ensembles: Building blocks of neural circuits. *Neuron*. 2024 112:875-92. doi:10.1016/j.neuron.2023.12.008.
143. Yuste R, Goering S, Arcas BAY, Bi G, Carmena JM, Carter A, Fins JJ, Friesen P, Gallant J, Huggins JE, Illes J, Kellmeyer P, Klein E, Marblestone A, Mitchell C, Parens E, Pham M, Rubel A, Sadato N, Sullivan LS, Teicher M, Wasserman D, Wexler A, Whittaker M, Wolpaw J. Four ethical priorities for neurotechnologies and AI. *Nature*. 2017 551:159-63. doi:10.1038/551159a.
144. Yuste R. Advocating for neurodata privacy and neurotechnology regulation. *Nat Protoc*. 2023 18:2869-75. doi:10.1038/s41596-023-00873-0.
145. Zanello M, Pallud J, Baup N, Peeters S, Turak B, Krebs MO, Oppenheim C, Gaillard R, Devaux B. History of psychosurgery at Sainte-Anne Hospital, Paris, France, through translational interactions between psychiatrists and neurosurgeons. *Neurosurg Focus*. 2017 43(3):E9. doi: 10.3171/2017.6.FOCUS17250.
146. Zeng H, Huang X, Liu Y, Gu X. Exploring Neural Evidence of Attention in Classroom Environments: A Scoping Review. *Brain Sci*. 2025 15:860. doi:10.3390/brainsci15080860.
147. Zhang J, Li J, Huang Z, Huang D, Yu H, Li Z. Recent Progress in Wearable Brain-Computer Interface (BCI) Devices Based on Electroencephalogram (EEG) for Medical Applications: A Review. *Health Data Sci*. 2023, 3:0096. doi:10.34133/hds.0096. eCollection 2023.
148. Zhong X, Li G, Xu C, Luo R, Meng J, Schalk G. Detection of eye movements and eye blinks using a portable two-channel EEG platform. *J Neurosci Methods*. 2026, 425:110616. doi:10.1016/j.jneumeth.2025.110616.
149. Zhu R, Ma X, Wang Z, Hui Q, You X. Improving auditory alarm sensitivity during simulated aeronautical decision-making: the effect of transcranial direct current stimulation combined with computerized working memory training. *Cogn Res Princ Implic*. 2025, 10:11. doi:10.1186/s41235-025-00620-x.