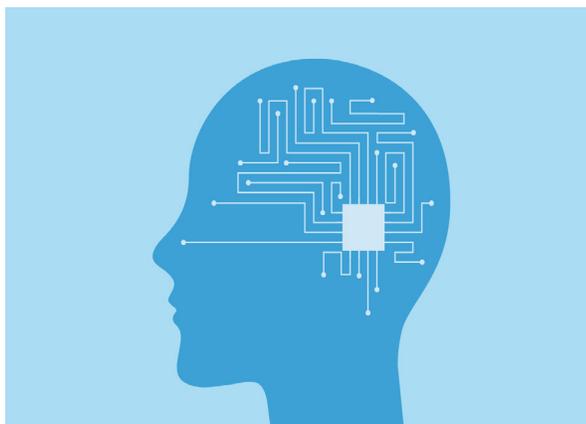


NOTE DU CONSEIL SCIENTIFIQUE CONSULTATIF SUR LA NEUROTECHNOLOGIE



QU'EST-CE QUE LA NEUROTECHNOLOGIE ?

La neurotechnologie est un terme générique désignant l'ensemble des technologies qui enregistrent ou modifient l'activité des neurones du système nerveux humain.¹ La neurotechnologie remplit au moins l'une des trois fonctions suivantes : (1) la neuroimagerie, qui consiste à surveiller la structure et le fonctionnement cérébral ; (2) la neuromodulation, qui vise à influencer certaines fonctions du cerveau ; et (3) les interfaces directes cerveau-ordinateur.²



Depuis plusieurs décennies, cette technologie joue un rôle essentiel dans le traitement de nombreuses pathologies et troubles parmi les plus répandus. La stimulation cérébrale profonde et la stimulation nerveuse ont permis d'éliminer les symptômes de la maladie de Parkinson et de l'épilepsie.³ Aujourd'hui, plus de 600 000 personnes peuvent entendre grâce aux implants cochléaires qui stimulent directement le nerf auditif.⁴ Par ailleurs, des centaines de milliers de personnes atteintes de lésions de la moelle épinière ou de troubles neurologiques ont pu retrouver leur mobilité et le contrôle de leurs membres grâce aux interfaces cerveau-ordinateur.⁵

POURQUOI EST-CE IMPORTANT ?

Les avancées de la neurotechnologie, en particulier dans le domaine des interfaces cerveau-ordinateur, sont appelées à devenir une composante bien plus intégrée de notre quotidien, dépassant largement le seul champ médical. L'utilisation généralisée de ces technologies soulève de profondes interrogations d'ordre éthique, ainsi des préoccupations croissantes en matière de droits humains et de sécurité.

QUELS SONT LES DERNIERS DÉVELOPPEMENTS ?

Des percées scientifiques récentes permettent aux interfaces cerveau-ordinateur d'évoluer au-delà de la simple restitution de sensations ou des fonctions motrices pour accéder à des niveaux plus avancés de cognition.⁶ Ces technologies sont désormais capables de faciliter des interactions toujours plus poussées entre l'humain et l'intelligence artificielle, dans lesquelles le cerveau et le système d'IA réagissent et s'adaptent mutuellement.

Au début de l'année 2024, la société Neuralink a réussi à implanter un dispositif doté d'intelligence artificielle chez un patient humain, lui permettant de contrôler des programmes informatiques uniquement par la pensée.⁷ Dans le même temps, une équipe de recherche chinoise associée à Neuralink annonçait une avancée vers une version entièrement sans fil, offrant des applications moins invasives et plus accessibles de cette technologie.⁸

Dès 2021, des chercheurs et chercheuses du California Institute of Technology ont dévoilé une technologie à ultrasons capable de « lire » l'activité cérébrale et d'anticiper certaines réponses

mentales. Cette approche non invasive pourrait révolutionner l'imagerie cérébrale en améliorant considérablement le diagnostic et le traitement de maladies neurologiques telles qu'Alzheimer ou l'épilepsie. Au-delà de ses applications médicales, elle pourrait également permettre de contrôler des environnements en réalité virtuelle ou augmentée à partir de signaux cérébraux.⁹

Le développement d'outils toujours plus précis et moins intrusifs contribue à rendre ce domaine plus sûr et plus accessible. Parmi les avancées récentes figurent le Stentrode de Synchron, une électrode insérée via les vaisseaux sanguins permettant une implantation sans chirurgie cérébrale ouverte;¹⁰ la « Flexible Electrode Array » de Precision Neuroscience, qui mobilise des milliers de micro-électrodes pour capter l'activité cérébrale avec une résolution fine;¹¹ ou encore les progrès vers des interfaces

optiques qui pourraient à terme quasiment éliminer le recours à des implants chirurgicaux.¹²

La neurotechnologie devient non seulement un élément de plus en plus courant dans la rééducation et le traitement des maladies et lésions cérébrales, mais elle s'étend également rapidement à des usages non médicaux. Avec le développement croissant de technologies sans fil et non invasives, les interfaces cerveau-ordinateur pourraient bientôt être intégrées dans des dispositifs portables du quotidien, permettant de surveiller la santé, d'améliorer la productivité au travail ou encore d'enrichir les expériences de réalité virtuelle.¹³ À terme, elles pourraient être intégrées dans les processus de prise de décision quotidienne d'un grand nombre de personnes, voire permettre de relier plusieurs individus afin d'accomplir des actions collectives.¹⁴

QUELS SONT LES RISQUES ?

À mesure que la neurotechnologie s'intègre plus couramment aux êtres humains, d'importantes implications éthiques et pratiques émergent, notamment :

• **VIE PRIVÉE, CONSENTEMENT AND DROITS DE L'HOMME** : La neurotechnologie recueille des données neuronales individuelles extrêmement sensibles susceptibles d'être piratées ou utilisées sans autorisation. La protection de la vie privée et le respect du consentement éclairé sont d'autant plus cruciaux que ces données pourraient être exploitées pour manipuler les pensées ou les comportements des individus.¹⁵ Dans le cas d'une adoption généralisée, des scénarios impliquant des États de surveillance et des formes autoritaires de gouvernance deviennent envisageables.¹⁶ Les préoccupations déjà soulevées par l'utilisation abusive des données personnelles issues des réseaux sociaux s'appliquent également à celles générées par la neurotechnologie, avec des conséquences potentiellement bien plus invasives. Le domaine du « neuromarketing », qui exploite les données cérébrales pour analyser les préférences des utilisateurs à des fins commerciales, est en passe de devenir un outil répandu pour les entreprises.¹⁷ En conséquence, le risque que la neurotechnologie entraîne des violations massives des droits de l'homme suscite une inquiétude croissante.¹⁸

• **LIBRE ARBITRE ET RESPONSABILITÉ** : Certains utilisateurs d'interfaces cerveau-ordinateur ont signalé une altération de leur perception du libre arbitre, allant jusqu'à avoir le sentiment que leurs actions ne leur appartiennent pas entièrement.¹⁹ Ce phénomène soulève d'importantes questions

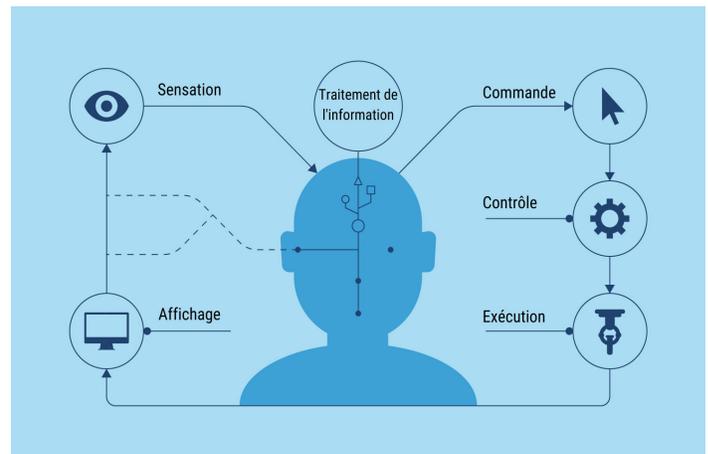


Schéma d'une interface cerveau-ordinateur

juridiques et éthiques à plus long terme quant à l'attribution des actions. On peut par exemple imaginer un scénario où une personne appuie sur la gâchette d'une arme à feu et affirme que c'est son interface informatique, et non elle-même, qui en est responsable. Lorsque les interfaces cerveau-ordinateur sont utilisées pour connecter plusieurs individus à des activités collectives, les notions de libre arbitre et de responsabilité pourraient devenir encore plus complexes, soulevant des enjeux inédits en matière de gouvernance et de réglementation.

• **SÉCURITÉ** : Le risque d'une course à l'armement autour de l'augmentation humaine s'accélère rapidement. On envisage désormais des soldats dotés de capacités augmentées par des technologies informatiques visant à renforcer leurs perceptions sensorielles, leurs temps de réaction ou leur en-

durance. L'idée de « soldats cyborgs » dotés de capacités surhumaines et connectés à des drones autonomes ou à d'autres systèmes d'armement ne sont plus uniquement de la science-fiction.²⁰ La guerre augmentée pourrait également donner lieu à des scénarios inédits qui ne sont pas pleinement pris en compte par les cadres actuels du droit international humanitaire, soulevant ainsi des défis juridiques et éthiques majeurs.²¹

• **INÉGALITÉ :** À ce jour, les capacités de développement et de test en neurotechnologie sont presque exclusivement localisées dans les pays du Nord global. Cela signifie que les avancées en neurotechnologie et leurs bénéfices socio-économiques seront principalement concentrés dans les pays développés. À plus long terme, cela pourrait creuser une fracture entre sociétés « augmentées » et « non augmentées », renforçant encore les inégalités mondiales.²²

QUELLES SONT LES IMPLICATIONS

À ce jour, la régulation de la neurotechnologie est assurée presque exclusivement par les gouvernements nationaux ou les organisations régionales.²⁶ L'absence de normes convenues au niveau international pourrait exacerber certains risques, en particulier en ce qui concerne une « course à l'armement de l'augmentation », et permettre des usages dangereux dans de nombreuses régions du monde. Dans ce contexte, l'ONU a pris des mesures importantes, notamment à travers la Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme de l'UNESCO, qui fournit un cadre normatif pour un développement sûr et équitable de la neurotechnologie.²⁷ Le Conseil des droits de l'homme des Nations Unies s'est également saisi des impacts potentiels de la neurotechnologie sur les droits humains, en créant un comité consultatif et en lançant une étude sur le sujet.²⁸ Bien que nécessaires, ces initiatives sont probablement insuffisantes face à l'ampleur croissante des risques liés au développement de la neurotechnologie.

QUELS SONT LES ENJEUX A PRENDRE EN COMPTE ?

• **RECHERCHE ÉTHIQUE ET DÉVELOPPEMENT ÉQUITABLE DE LA NEUROTECHNOLOGIE.** L'impact croissant de la neurotechnologie pourrait nécessiter l'adoption de règles et/ou de réglementations plus spécifiques encadrant la recherche

et le développement.²³ En particulier, des règles claires et des protections renforcées en matière de consentement éclairé devraient régir le développement des interfaces cerveau-ordinateur.²⁴ Garantir un accès équitable aux bénéfices de la neurotechnologie devrait également être une priorité.

• **NORMES MONDIALES DE PROTECTION DES DONNÉES.** Les cadres existants en matière de protection des données dans l'Union européenne et aux États-Unis comportent déjà certaines dispositions applicables à la neurotechnologie.²⁵ Toutefois, à mesure que son utilisation se généralise, il pourrait devenir nécessaire de revoir les normes et standards mondiaux de protection des données afin de mieux répondre aux risques spécifiques qu'elle présente. Un état des lieux des réglementations nationales, régionales et internationales, en mettant l'accent sur leur efficacité et les protections offertes, pourrait constituer une prochaine étape utile.

• **UN FORUM RÉUNISSANT RÉGULATEURS, ACTEURS DU SECTEUR PRIVÉ, UTILISATEURS ET SCIENTIFIQUES.**

La mise en place de garde-fous efficaces autour de la neurotechnologie nécessitera des échanges structurés entre les communautés scientifiques, réglementaires, industrielles et citoyennes. À mesure que les usages de la neurotechnologie s'étendent au-delà du domaine médical, il sera essentiel de créer des espaces de dialogues rassemblant des experts en réglementation, en commerce et en recherche scientifique afin de garantir un développement encadré et responsable.

• **UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DES RISQUES POUR LA SÉCURITÉ MONDIALE.** Les impacts potentiels de la neurotechnologie dans le domaine militaire commencent à peine à être examinés. Des discussions dédiées aux questions juridiques et pratiques liées à l'augmentation humaine pourraient être menées au sein des principales instances de gouvernance régionale et internationale en matière de sécurité.

Pour garantir un accès équitable aux avancées en neurotechnologie, le Sud global a besoin du soutien du Nord global à travers le transfert de connaissances, l'investissement dans les infrastructures de recherche et des initiatives de renforcement des capacités. La création de centres de recherche régionaux, de cadres de gouvernance éthique et de programmes de développement des talents permettra de stimuler l'innovation tout en répondant aux défis éthiques et sécuritaires.

RÉFÉRENCES

- 1 UNESCO, *The Risks and Challenges of Neurotechnologies for Human Rights*, 2022.
- 2 Les termes Interface Cerveau-Ordinateur (« Brain-Computer Interface », ou BCI en anglais) et Interface Cerveau-Machine (« Brain-Machine Interface », ou BMI en anglais) sont souvent utilisés de manière interchangeable. L'interface cerveau-machine a tendance à faire référence à des machines implantées directement sur des humains tandis que l'interface cerveau-ordinateur peut également couvrir des technologies non-invasives. Étant donné que les principales percées scientifiques concernent la convergence entre IA et humains, cette note utilise le terme interface cerveau-ordinateur. Voir Rapeaux, A. B., & Constandinou, T. G. (2021). Implantable brain machine interfaces: first-in-human studies, technology challenges and trends. *Current opinion in biotechnology*, 72, 102-111.
- 3 Stacey, W. C., & Litt, B. (2008). Technology insight: neuroengineering and epilepsy—designing devices for seizure control. *Nature clinical practice Neurology*, 4(4), 190-201.
- 4 Prins, N. W., Monteleone, R., Soldado-Magraner, J., Nash, J. E., Young, M. J., & Cabrera, L. (2022, November). Reexamining the ethical, legal, social, and cultural implications for cochlear implants through a novel neuroethics framework. In *2022 IEEE International Symposium on Technology and Society (ISTAS)* (Vol. 1, pp. 1-6). IEEE; Van Opstal, A. J., & Noordanus, E. (2023). Towards personalized and optimized fitting of cochlear implants. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1183126.
- 5 Lorach, H., et al. (2023). Walking naturally after spinal cord injury using a brain–spine interface. *Nature*, 618(7963), 126-133; Losanno, E., et al. (2023). Neurotechnologies to restore hand functions. *Nature Reviews Bioengineering*, 1(6), 390-407.
- 6 Gao, X., Wang, Y., Chen, X., and Gao, S. "Interface, Interaction, and Intelligence in Generalized Brain–Computer Interfaces." *Trends in Cognitive Sciences* 25, no. 8 (2021): 671-684; Naddaf, M. "Mind-Reading Devices Are Revealing the Brain's Secrets." *Nature* 626, no. 8000 (2024): 706-708; Liu, Z., et al. "Neural Signal Analysis with Memristor Arrays Towards High-Efficiency Brain–Machine Interfaces." *Nature Communications* 11, no. 1 (2020): 4234; Rapeaux, A. B., and Constandinou, T. G. "Implantable Brain Machine Interfaces: First-in-Human Studies, Technology Challenges and Trends." *Current Opinion in Biotechnology* 72 (2021): 102-111; Lv, Z., Qiao, L., Wang, Q., and Piccialli, F. "Advanced Machine-Learning Methods for Brain-Computer Interfacing." *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics* 18, no. 5 (2020): 1688-1698; Rasheed, S. "A Review of the Role of Machine Learning Techniques Towards Brain–Computer Interface Applications." *Machine Learning and Knowledge Extraction* 3, no. 4 (2021): 835-862; Aggarwal, S., and Chugh, N. "Review of Machine Learning Techniques for EEG Based Brain Computer Interface." *Archives of Computational Methods in Engineering* 29, no. 5 (2022): 3001-3020; Tonin, L., and Millán, J. D. R. "Noninvasive Brain–Machine Interfaces for Robotic Devices." *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 4 (2021): 191-214; J. Sanchez and C. Principe. *Brain-Machine Interface Engineering*. Springer, 2022.
- 7 M. Sparkes, "Has Neuralink Made a Breakthrough in Brain Implant Technology?" *New Scientists*, mars 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.newscientist.com/article/2423483-has-neuralink-made-a-breakthrough-in-brain-implant-technology/>
- 8 Pandaily, "China's Tsinghua University Made Breakthrough in Brain-Computer Interface Research," mars 2024. Disponible à l'adresse : <https://pandaily.com/chinas-tsinghua-university-made-breakthrough-in-brain-computer-interface-research/>.
- 9 L. Dajose, "Mind Control Breakthrough: Caltech's Pioneering Ultrasound Brain–Machine Interface," *SciTech Daily*, décembre 2023; S. Norman, et al. "Single-trial Decoding of Movement Intentions Using Functional Ultrasound Neuroimaging." *Neuron* 109, no. 9 (2021): 1554-66. *Nature Neuroscience*, 2024.
- 10 IT Technology Review. "You've Heard of Neuralink. Meet the Other Companies Developing Brain-Computer Interfaces." *MIT Technology Review*, 2024; JAMA Network. "FDA Approval for Human Clinical Trials of Synchron's Stentrode." *JAMA Network*, 2021.
- 11 C. Hale, "Precision Neuroscience Deploys 4,096 Electrodes in Brain-Computer Interface Procedure," *Fierce Biotech*, May 31, 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.fiercebitech.com/medtech/precision-neuroscience-deploys-4096-electrodes-brain-computer-interface-procedure>.
- 12 NT Ersaro, C Yalcin, and R Muller, "The Future of Brain-Machine Interfaces is Optical," *Nature Electronics*, February 2023.
- 13 Ienca, M., & Vayena, E. (2019). Direct-to-Consumer Neurotechnology: What Is It and What Is It for? *AJOB Neuroscience*, 10(4), 149–151. <https://doi.org/10.1080/21507740.2019.1668493>.
- 14 Yuste, R., and Goering, S. "Ethical Implications of Advances in Neurotechnology." *Nature Reviews Neuroscience* 18, no. 9 (2017): 521-533. doi:10.1038/nrn.2017.85; Nicolelis, M.A.L. "Brain-to-Brain Communication Has Arrived." *Scientific American*, 2019; Kurzweil, R. *The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology*. Viking Press, 2005.
- 15 Voir, Wexler, A. "Challenges and Advances in Brain-Computer Interfaces." *Penn Today*, 2023. Available at: <https://penntoday.upenn.edu/news/challenges-and-advances-brain-computer-interfaces>.
- 16 Voir, J. Rafferty, "Brain-Computer Interfaces: A New Existential Risk Factor," *Journal of Futures Studies*, 2021, Vol. 26(2) 51–65.
- 17 Cruz, C., et al., Neuromarketing and the advances in the consumer behaviour studies: A systematic review of the literature, *IJBG* 2016;17;3:330-351; Baños-González, et al., The Application of Neuromarketing Techniques in the Spanish Advertising Industry: Weaknesses and Opportunities for Development, *Front. Psychol.* 2020;11.
- 18 Sosa N., M. Salvador Dura-Bernal, G. Carla Maria, and S. Clare, eds. 2022. The risks and challenges of neurotechnologies for human rights. UNESCO Report. doi:10.54678/ POGS7778; Susser, D., & Cabrera, L. Y. (2023). Brain Data in Context: Are New Rights the Way to Mental and Brain Privacy? *AJOB Neu-*

rosience, 15(2), 122–133. <https://doi.org/10.1080/21507740.2023.2188275>; Zuboff, S. (2023). The age of surveillance capitalism. In *Social theory re-wired* (pp. 203-213). Routledge.

19 Klein, E. et al. *Brain-Computer Interfaces* 3, 140–148 (2016).

20 Binnendijk, A., Marler, T., and Bartels, E. *Brain-Computer Interfaces: U.S. Military Applications and Implications, An Initial Assessment*. RAND Corporation, 2020; Emondi, A. 2019. Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology: DARPA. Link: <https://www.darpa.mil/program/nextgeneration-nonsurgical-neuro-technology>; Rickli, J. M., & Ienca, M. (2021). The security and military implications of neurotechnology and artificial intelligence. *Clinical Neurotechnology Meets Artificial Intelligence: Philosophical, Ethical, Legal and Social Implications*, 197-214; Kosal, M., & Putney, J. (2023). Neurotechnology and international security: Predicting commercial and military adoption of brain-computer interfaces (BCIs) in the United States and China. *Politics and the Life Sciences*, 42(1), 81-103.

21 Lubell, Noam and Al Khateeb, Katya. "Cyborg Soldiers: Military Use of Brain-Computer Interfaces and the Law of Armed Conflict." In *Big Data and Armed Conflict: Legal Issues Above and Below the Armed Conflict Threshold*, edited by Laura A. Dickinson & Edward Berg. Oxford University Press, 2022. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4160967>; Ienca, M., Jotterand, F. and Elger, B.S. (2018) From Healthcare to Warfare and Reverse: How Should We Regulate Dual-Use Neurotechnology? *Neuron* 97: 269–274; Mahfoud, T., Aicardi, C., Datta, S. and Rose, N. (2018) The Limits of Dual-Use. *Issues in Science and Technology* 34(4): 73–78.

22 Voir, Maiseli, B., Abdalla, A.T., Massawe, L.V. et al. Brain-computer interface: trend, challenges, and threats. *Brain Inf.* 10, 20 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40708-023-00199-3>; Hariri, Y. N. (2017). *Hariri, Y. N. Homo Deus: A Brief History of Tomorrow*. Vintage, 2017.

23 Voir, Ienca, M., Fins, J.J., Jox, R.J. et al. Towards a Governance Framework for Brain Data. *Neuroethics* 15, 20 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12152-022-09498-8>

24 La publication récente par l'UNESCO d'un projet de lignes directrices éthiques constitue un point de départ utile : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000389768?posInSet=1&queryId=cfc56e24-7a88-4b19-90e7-63bcfc4e556b>. Voir également Yuste, R. Advocating for neurodata privacy and neurotechnology regulation. *Nat Protoc* 18, 2869–2875 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41596-023-00873-0>.

25 Voir, Rainey, S., McGillivray, K., Akintoye, S., Fothergill, T., Bublitz, C., & Stahl, B. (2020). Is the European Data Protection Regulation sufficient to deal with emerging data concerns relating to neurotechnology?. *Journal of Law and the Biosciences*, 7(1), Isaa051; Field, R. I. (2023). The data we leave behind: Limits of legal protections for neurotechnology and genomic data. *Drexel L. Rev.*, 15, 769.

26 Voir, par exemple the China Brain Project, the European Union's (EU) Human Brain Project (HBP), Israel Brain Technologies, Japan's Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies (Brain/MINDS), ainsi que : US Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN) Initiative. Amunts, K., C. Ebell, J. Muller, M. Telefont, A. Knoll, and T. Lippert. 2016. "The Human Brain Project: Creating a European Research Infrastructure to Decode the Human Brain." *Neuron* 92: 574–581; Jeong, S. J., H. Lee, E. M. Hur, Y. Choe, J. W. Koo, J. C. Rah, K. J. Lee, et al. 2016. "Korea Brain Initiative: Integration and Control of Brain Functions." *Neuron* 92 (3): 607–611; Martin, C. L., and M. Chun. 2016. "The BRAIN Initiative: Building, Strengthening, and Sustaining." *Neuron* 92 (3): 570–573; Okano, H., E. Sasaki, T. Yamamori, A. Iriki, T. Shimogori, Y. Yamaguchi, K. Kasai, and A. Miyawaki. 2016. "Brain/MINDS: A Japanese National Brain Project for Marmoset Neuroscience." *Neuron* 92 (3): 582–590.

27 Voir le cadre proposé par l'UNESCO pour la neurotechnologie, disponible à l'adresse : <https://www.unesco.org/fr/articles/ethique-des-neuro-technologies-lunesco-designe-un-groupe-dexperts-internationaux-pour-elaborer-le>; voir aussi Jan Christoph Bublitz (2024) What an International Declaration on Neurotechnologies and Human Rights Could Look like: Ideas, Suggestions, Desiderata, *A JOB Neuroscience*, 15:2, 96-112, DOI: 10.1080/21507740.2023.2270512.

28 A/HRC/RES/51/3 (octobre 2022). Voir également, <https://www.ohchr.org/en/hr-bodies/hrc/advisory-committee/neurotechnologies-and-human-rights>.