

VOYAGE VERS LE FUTUR DU CERVEAU

Pierre-Marie LLEDO



L'esprit humain est bien trop vaste pour se laisser enfermer dans une boîte crânienne, quand bien même celle-ci, avec ses 1 400 cm³, nous semble surdimensionnée. Néanmoins, il est vrai que les éléments dont notre cerveau est constitué n'ont rien d'unique ou de magique : ce sont les mêmes qui permettent aux étoiles de naître, briller et mourir. Étonnant de réaliser que les mêmes atomes qui contribuent à la fabrication des étoiles, depuis ce fameux *big-bang*, sont à l'œuvre dans la genèse de nos pensées. Par leurs programmes de recherche visant à naturaliser l'esprit et interpréter les fonctions mentales comme le produit de processus biochimiques ou biophysiques, les Sciences du cerveau¹ ne cessent de nous surprendre.

Ces Sciences nous apprennent à reconnaître et dénommer les territoires cérébraux, voire les circuits nerveux, impliqués dans l'émergence de fonctions aussi complexes que celles à l'œuvre dans le

.....
1 Ces Sciences que l'on regroupe aussi sous le vocable de Neurosciences, comprennent les Sciences cognitives, l'éthologie, la neurobiologie, l'ingénierie, les mathématiques, la chimie et la physique. C'est actuellement le champ scientifique porteur du plus grand nombre de ruptures épistémologiques.

langage, le rêve, les sensations, le plaisir ou la prise de décision. Ces connaissances sont telles que des algorithmes sophistiqués permettent de relier directement les flux d'activité du cerveau à un dispositif qui effectue les gestes que nous imaginons². Mais pourrions-nous franchir la prochaine étape auquel la philosophie se heurte depuis son avènement lorsqu'elle tente de rendre compte de nos expériences subjectives ? Est-ce que cette Science émergente suffira à expliquer le ressenti d'un sujet qui savoure un mets exquis, interpréter le vécu d'un mélomane s'émerveillant à l'écoute d'une symphonie, ou décrypter les impressions que l'on éprouve en humant les effluves de jasmin ? Dit autrement, l'approche matérialiste réductionniste saura-t-elle un jour capturer l'essence même d'un *qualia*³, ce ressenti unique à chacun et impossible à communiquer ?

Suite aux immenses progrès qui ont été réalisés depuis une quinzaine d'années, nous sommes sur le point de décrypter le fonctionnement intime de notre cerveau, d'expliquer comment nos pensées émergent dans notre tête, comment la mémoire se forme, se transforme et disparaît, ou comment nos facultés cognitives s'enrichissent avec l'expérience. Tous ces accomplissements scientifiques offrent la possibilité de soulager l'humanité du fardeau de plus en plus pesant des troubles neurologiques, avec leur lot de maladies neuro-dégénératives, mais également des désordres psychiatriques liés à la souffrance mentale. Dans ce contexte, le progrès scientifique est attendu, et même espéré, car il s'associe à la promesse d'un futur heureux, d'une meilleure qualité de vie et d'une espérance de vie prolongée. En revanche, dès lors qu'il s'agit de comprendre les mystères du cerveau humain, tant sur un plan philosophique que social, l'optimisme associé à ces grandes découvertes s'efface devant les craintes d'un réductionnisme simpliste qui aliénerait l'humain.

2 On nomme ce dispositif « interface cerveau-machine ».

3 C'est l'aspect vécu, intrinsèque, des représentations conscientes. Cette propriété de la perception conduit à une expérience subjective de la sensation, autrement dit à transformer la matière en sensation. Cette opération représente depuis longtemps la plus grande difficulté philosophique du problème de la conscience.

Cet article dresse le bilan des recherches contemporaines qui visent à décrypter les mécanismes de la pensée et montre les extraordinaires perspectives, pratiques et intellectuelles, qui impacteront les champs technologiques, philosophiques et éthiques de nos quotidiens, pour le meilleur comme pour le pire.

Quand la Science ne fait plus rêver

Pour comprendre le fonctionnement d'une machine complexe, il est opportun, voire incontournable, de connaître la composition des pièces qui la constituent. Nous pouvons aujourd'hui décrire la voie

qu'emprunte l'ébauche embryonnaire du cerveau, à partir de quelques cellules, pour entamer sa métamorphose et devenir cette belle machine complexe qui trône au sommet de chacun d'entre nous. Ce travail de fond conduit à des progrès significatifs qui permettent d'envisager sereinement de comprendre les grandes fonctions de notre cerveau, de décrypter nos pensées, de réparer les circuits nerveux défectueux, de réinventer de nouvelles stratégies thérapeutiques en matière de santé mentale, ou de traiter des maladies neurologiques invalidantes comme la maladie d'Alzheimer ou de Parkinson, fléaux des temps modernes.



Quel seuil reste tolérable pour modifier les grandes fonctions physiologiques et conserver les traits humains ? Peut-on modifier nos états de conscience sans altérer notre identité ? ”

Pourtant, devant cette urgence sanitaire, paradoxalement on continue de craindre ces découvertes scientifiques et nombre de nos citoyens souhaiteraient voir la marche de ces recherches ralentir. Il est vrai qu'elles ne vont pas sans poser moult questions éthiques dès lors qu'il s'agit, non pas de soigner, mais d'augmenter les performances cognitives d'un sujet sain, manipuler sa mémoire, ou

construire *in vitro* un cerveau isolé à partir de cellules souches⁴. À l'ère du forçage technologique, s'il est possible d'intervenir sur le cerveau humain pour le modifier, il est plus difficile de préciser à partir de quel changement notre unité centrale aura perdu ses caractéristiques humaines pour devenir un objet-outil de notre propre création ? Dans ce cas, quel seuil reste tolérable pour modifier les grandes fonctions physiologiques et conserver les traits humains ? Peut-on modifier nos états de conscience sans altérer notre identité ?

Ces questions se posent à nous de façon urgente et péremptoire car il est bon de rappeler que ce qui fait l'humain, ce ne sont pas tant ses muscles, son sang ou ses jambes, que sa tête. Dès lors qu'il est possible d'intervenir directement sur le cerveau pour le modifier ou le transformer, la sempiternelle question de la nature humaine et de sa consubstantielle liberté se pose actuellement à nous comme un écho qui n'en finit pas de résonner. La Science s'emballe, et nous n'en sommes qu'au tout début. Commençons sans plus tarder ce voyage aux frontières de l'inconnu où la Science cherche à percer le mystère de la matière grise.

Décrypter le code de la conscience : un projet démiurge ?

Dès lors que les Sciences du cerveau représentent un vaste programme de naturalisation de la pensée, elles impactent chacun de nous en tant que membres de la communauté humaine. Elles nous invitent à revisiter notre propre conception de l'humain. Malgré ses excès, parfois même son outrecuidance philosophique, l'émergence des Sciences du cerveau ne doit pas nous laisser indifférents : elle

4 On parle dans ce cas d'organoïde lorsque des cellules souches produisent des cellules qui s'agrègent et se transforment en un organe cultivé dans les trois dimensions de l'espace. Ces organoïdes, sortes de mini-organes, promettent de prendre une place cruciale dans la recherche biomédicale de demain en tant que révolution technique, mais également préclinique, car les organoïdes permettent de comprendre la toxicité et l'action d'une molécule pharmacologique (une nécessité pour la mise sur le marché de tout nouveau médicament), voire clinique, puisque la genèse d'une pathologie peut être récapitulée par le processus de formation de l'organoïde.

est annonciatrice d'un changement culturel propre aux sociétés développées qui, inévitablement, sont amenées à aborder la question de ce qui fait la spécificité de l'humain sous un angle nouveau, en particulier celui des relations que nous entretenons avec le monde et la place absolument essentielle que joue le visage de l'altérité dans le fonctionnement de notre cerveau.

Nous entrons dans une époque totalement vertigineuse où des projets démiurges et prométhéens s'attaquent au dernier rempart de l'ignorance : le cerveau. Si nous ne prenons pas part aux débats

actuels sur le sens à donner aux connaissances acquises sur le cerveau, il est possible que l'humanité devienne un jour nihiliste, renonçant à l'intérêt de sa propre existence au profit de la technologie qui viserait à accroître nos facultés mentales.

Ce potentiel disruptif serait alors une source de clivage dont nous observons déjà les prémices au travers d'affrontements entre les libertaires avides de technoscience, les « neuro-transgressistes », qui militent pour un monde globalisé, plus équitable,

totallement contrôlé par la puissance des technologies. Leurs destructeurs, les « neuro-conservateurs », nous rappellent la question des normes, des règles et des valeurs morales, seules garantes de l'intégrité de la nature humaine.

On l'aura compris, l'impact des découvertes fondamentales et appliquées des Sciences du cerveau vont bien au-delà du champ restreint des Neurosciences. Ces découvertes bousculent aussi bien les philosophes que les législateurs, les sciences de l'éducation, les psychologues, la médecine et bien sûr l'opinion publique. Dans ce conflit idéologique, il s'agit de débattre sur une partie de l'avenir de l'humanité et de ses possibles transformations (ou auto-transformations), souhaitables ou subies. S'interroger sur la question du sens

Il est possible que l'humanité devienne un jour nihiliste, renonçant à l'intérêt de sa propre existence au profit de la technologie qui viserait à accroître nos facultés mentales."

de la marche des Sciences ne trahit pas une volonté de ralentir le progrès scientifique car cela supposerait *ipso facto* vouloir imputer des dommages à l'humanité. Chercher à retarder, à ralentir, voire à empêcher le progrès des connaissances en bridant les idées, serait une façon certaine de priver les professionnels de la santé de progrès techno-scientifiques qui font tant pour leur réputation aujourd'hui. Mais en même temps que les progrès se font et s'imposent à tous, il est nécessaire qu'une véritable culture de l'échange du savoir et une démocratisation des choix socio-technologiques soient mises en place dès lors qu'il s'agit de notre cerveau.

Même si le bon sens populaire nous rappelle avec une certaine ironie que le plus difficile pour les prospectivistes reste de prévoir l'avenir⁵, nous savons déjà qu'en s'attaquant à la dernière forteresse des Sciences pour comprendre le fonctionnement du cerveau, ce XXI^e siècle naissant ne sera certainement pas un long fleuve tranquille. Sans plus tarder, débutons l'exploration des connaissances scientifiques récemment acquises pour esquisser les enjeux et défis que nous aurons à relever.

Les promesses des Sciences du cerveau

Dire que la période actuelle est faste en matière de découvertes scientifiques est un euphémisme dans un secteur qui se place à la croisée de disciplines aussi diverses que la psychologie expérimentale et sociale, l'éthologie, la psychiatrie, la modélisation, l'intelligence artificielle et la neurobiologie. La révolution neuroscientifique qui est née au tournant du XIX^e siècle offre soudainement à toutes ces disciplines prises isolément, des capacités normatives, explicatives, voire prédictives, auxquelles leur statut initial de science empirique ne les autorisait pas.

5 Le physicien et prix Nobel Enrico Fermi rappelait que 'les prédictions sont une entreprise risquée, surtout quand elles concernent l'avenir'.

Selon le *Charmide* de Platon, le plus ancien des trois préceptes gravés sur le fronton du temple d'Apollon à Delphes était le « connais-toi toi-même » socratique. Pour répondre à cette injonction, des efforts financiers majeurs ont été consentis pour révéler le fonctionnement intime du cerveau et identifier le siège de la pensée. Au cours des années 2010, la course aux grands projets d'incitation de la recherche sur cette « dernière frontière scientifique » prit une dimension mondiale, comme le fut autrefois la conquête spatiale durant la guerre froide. Après Israël qui lança son projet *Brain Technologies* en 2011, les États-Unis suivirent en 2013 avec leur *Brain Initiative* et l'Europe démarra la même année un vaste programme intitulé *Human Brain Project*. Ce fut ensuite au tour du Japon de se profiler par son *Brain*

Mapping (2014), puis en 2016 la Chine lança le *Brain Science Project*, le Canada son *Brain Canada initiative* et l'Australie initia son programme *Australian Brain Alliance*⁶. Si les efforts financiers accordés pour ces programmes varient d'un pays à l'autre (plusieurs milliards de dollars pour les États-Unis, l'Union Européenne et la Chine, plusieurs centaines de millions pour le Canada, l'Australie et le Japon), tous poursuivent le même ob-

jectif : acquérir le statut de nation suprême, voire hégémonique, conféré par la découverte du code de la pensée.

Dans cette compétition planétaire, les stratégies scientifiques diffèrent d'un continent à l'autre. La Chine opta pour un programme articulé autour de trois axes : identifier les mécanismes de la neuro-circuiterie qui sous-tendent les fonctions cognitives, imaginer des outils de diagnostic et de traitement précoces des maladies mentales ou neurodégénératives, et développer les technologies intelligentes reliant cerveau et machine. À l'inverse, le *Human Brain Project* as-

Dans cette compétition planétaire, les stratégies scientifiques diffèrent d'un continent à l'autre. ”

6 G-Science Academies. Understanding, Protecting, and Developing Global Brain Resources, 2016.

socie plusieurs dizaines de laboratoires européens pour simuler le fonctionnement normal du cerveau à partir de super-ordinateurs.

Aux États-Unis, le projet *Brain Initiative* met l'accent sur l'avènement de nouvelles techniques nécessaires pour relever tous ces défis.

En lançant ce projet, le président Barack Obama expliquait que ce projet « donnera aux scientifiques les outils dont ils ont besoin pour obtenir une image dynamique du cerveau en action et pour comprendre comment on pense, on apprend et on se souvient. » Lors de cette déclaration, il soulignait que « les idées sont la puissance de notre économie. (...) Quand nous investissons dans les meilleures

idées avant tout le monde, nos entreprises et nos travailleurs fabriquent les meilleurs produits et délivrent les meilleurs services avant les autres. Et grâce à cet incroyable dynamisme, nous n'attirons pas uniquement les meilleurs scientifiques et les meilleurs entrepreneurs, nous investissons aussi continuellement dans leur succès. » La guerre économique est bel et bien engagée.



Les connaissances du cerveau s'accroissent à une vitesse bien plus rapide que le temps nécessaire pour les expliquer et les diffuser à une large audience... ”

Grâce à cette armada de chercheurs, un nouveau continent se révèle peu à peu à nous. Cette *terra incognita* est le siège de la mémoire, des pensées, des émotions et des comportements. Les possibilités d'intervenir sur ce vaste territoire sont multiples, que ce soit par l'intermédiaire de substances chimiques ou de procédés plus ou moins invasifs tels que l'imagerie cérébrale, la stimulation magnétique transcrânienne, les implants ou les neuroprothèses. Par souci d'efficacité, les chercheurs optent pour des outils technologiques qui favorisent les approches dites multi-échelles, c'est-à-dire ceux qui permettent de s'affranchir des frontières biologiques pour aborder simultanément tous les niveaux d'organisation, de la molécule,

jusqu'au comportement et réciproquement. Grâce à cette approche inspirée des Sciences qui traitent les « systèmes complexes », les connaissances du cerveau s'accumulent à une vitesse bien plus rapide que le temps nécessaire pour les expliquer et les diffuser à une large audience... alors même que ces découvertes conduisent à des changements de société aussi radicaux que ceux produits au XIX^e siècle par la chimie ou au XX^e siècle par la physique quantique.

Un infiniment petit pour comprendre l'immensément grand

Grâce aux progrès de la microscopie, il est désormais possible d'observer de façon dynamique l'architecture des circuits cérébraux et les formes si particulières des neurones. La puissance actuelle de la microscopie permet de percer les mystères de l'infiniment petit en rendant visibles des structures bien plus petites que les neurones : les synapses. Ces contacts entre neurones ne dépassent guère le millième de millimètre, mais nos microscopes toujours plus puissants permettent de les observer lorsque le cerveau est en action et de s'apercevoir qu'ils sont extrêmement mobiles, toujours à l'affût d'un partenaire pour créer de nouveaux chemins où déambulent les impulsions nerveuses dans les limbes de nos pensées.

Sous l'action d'une expérience particulière, comme l'apprentissage associant stimulation et récompense par exemple, il est possible de suivre, en temps réel, tous les changements d'états des circuits, des neurones et des synapses. À cette échelle microscopique, le cerveau ressemble plutôt à une fourmilière qui s'affaire aux tâches quotidiennes. Pour paraphraser Henri Bergson, cette agitation sous la boîte crânienne nous rappelle que « la vie est entendue en un mouvement créateur ».

Grâce aux nanotechnologies, il est même possible de scruter les récepteurs des messagers chimiques qui se déplacent rapidement à la surface des neurones. La vidéo-microscopie employée sur de longues durées estime à plusieurs dizaines de micromètres la distance

de navigation parcourue par les récepteurs. Cette frénésie de mouvement à la surface des neurones était jusqu'à peu insoupçonnée, car le dogme central présentait la synapse comme un élément physiquement stable. L'avantage fourni par ce trafic de surface est évident puisqu'il offre des moyens supplémentaires aux neurones pour s'adapter aux changements de l'environnement en ajustant la communication inter-neuronale de façon dynamique. Il n'est donc pas étonnant que cette mobilité soit associée aux processus de réponse au stress ou à l'apprentissage.

Ne nous trompons pas, les photographes de l'esprit n'existent pas encore ! ”

Notons au passage que le progrès de l'infiniment petit ne bénéficie pas uniquement au monde de la microscopie. Une technique d'imagerie cérébrale récente, la magnétoencéphalographie (MEG), s'appuie sur la détection des champs magnétiques extrêmement faibles (de l'ordre du femtoteslas, soit 10-15 tesla)⁷

produits par le passage d'impulsions électriques dans nos circuits cérébraux. Des capteurs extrêmement sensibles sont positionnés près de la tête pour détecter l'activité électromagnétique de plusieurs milliers de neurones. Avec sa très haute résolution temporelle, de l'ordre d'un millième de seconde, la MEG permet de capter des événements très fugaces, compatibles avec la vitesse de nos pensées. Cette précision est redoutable pour étudier la synchronisation des activités nerveuses : certaines maladies psychiatriques comme la schizophrénie et autres psychoses sont d'ailleurs revisitées aujourd'hui à l'aune de synchronisations défectueuses.

7 Par comparaison, le champ magnétique terrestre est 10 milliards de fois supérieur, rendant très difficile la détection des faibles signaux émis par les circuits nerveux, véritablement engloutis dans les signaux parasites de l'environnement.

À la MEG viennent s'ajouter l'imagerie par résonance magnétique (IRM)⁸ et l'électroencéphalographie (EEG) nécessaires pour mesurer l'activité des régions superficielles du cerveau. Que les signaux soient détectés par EEG ou par MEG, ils sont traités par des algorithmes sophistiqués pour reconstruire l'évolution temporelle et spatiale de l'activité nerveuse ainsi capturée. En combinaison avec des détecteurs de plus en plus sensibles, ces algorithmes puissants permettent d'obtenir des images détaillées de la dynamique du cerveau. Ces cartes d'activité traduisent des représentations mentales diverses comme celles générées par la lecture, la résolution d'un problème mathématique ou par une sensation esthétique. Mais n'oublions pas que ces belles images colorisées ne sont finalement que le résultat de reconstructions théoriques produites par de savants calculs, et non d'une observation directe de l'activité nerveuse. Bref, ne nous trompons pas, les photographes de l'esprit n'existent pas encore !

Il n'en demeure pas moins vrai que durant les dix dernières années, les cartes mentales obtenues à partir des enregistrements provenant de MEG ont atteint un degré de précision inégalé. Ces progrès les rapprochent des images obtenues par IRM, tomographie par émission de positons⁹, ou encore imagerie par tenseur de diffusion¹⁰. Certaines pathologies mentales bénéficient déjà de cet apport technologique qui détecte de subtiles anomalies spatiales ou temporelles de l'activité cérébrale invisibles auparavant. Il est possible de dire aujourd'hui « montre-moi ton cerveau et je te dirai qui tu es ». Par exemple, associée à la tractographie de fibres, l'imagerie par diffuseur de tensions permet d'explorer les anomalies du cerveau associées à la maladie d'Alzheimer ou encore à des désordres psychiatriques, des tumeurs,

8 L'IRM fonctionnelle permet d'enregistrer l'activité des circuits nerveux de sujets placés en situation expérimentale ou clinique.

9 Technique qui détecte des molécules radioactives administrées par voie intraveineuse qui agissent comme de véritables balises dont le suivi permet de révéler le fonctionnement normal ou pathologique d'une région du cerveau.

10 Cette technique permet d'étudier l'organisation architecturale du cerveau avec ses connexions locales et de détecter en particulier des anomalies de la substance blanche non visible en imagerie conventionnelle. L'étude de l'agencement spatial des connexions permet de comprendre le fonctionnement « normal » du cerveau et l'étiologie de certaines pathologies neurologiques ou psychiatriques.

ainsi qu'aux ischémies cérébrales, bien avant les symptômes¹¹. De son côté, la MEG peut détecter chez des enfants dyslexiques, des anomalies importantes mais infiniment fugaces, qui se produisent environ cent-soixante-dix millisecondes après l'activation de la région cérébrale impliquée dans la reconnaissance invariante de la forme visuelle des mots. Sa détection permet aux thérapeutes d'adapter plus précisément leurs méthodes de réhabilitation.

Si tous ces moyens modernes permettent aux scientifiques de détecter, d'analyser et de scruter l'activité mentale sans ouvrir la boîte crânienne, voyons par quels truchements il est possible également, non plus de lire les pensées, mais d'intervenir sur leur genèse.

Prendre le contrôle des pensées

L'humain cherche depuis fort longtemps à corriger ses défauts avec les succès plus ou moins grands que nous avons connus avec la lobotomie, les électrochocs, les psychotropes et autres camisoles chimiques dont les français raffolent tant. L'essor de l'électronique médicale permet de renouveler l'arsenal thérapeutique ancien en offrant de nouveaux moyens d'intervention, certes plus précis, mais aussi plus transgressifs. La puissance des manipulations possibles tient au fait que les données recueillies par les techniques d'imagerie, de plus en plus sophistiquées, nourrissent des approches théoriques du fonctionnement cérébral, comme la modélisation mathématique des réseaux de neurones formels ou l'intelligence artificielle. L'approche n'est plus empirique, elle est guidée par de savants calculs de prédictions énoncées sur des bases théoriques.

L'entreprise titanesque, un tant soit peu démiurgique, qui consiste à vouloir agir sur le cerveau par l'électronique pour le réparer se trouve renforcée depuis peu par des progrès substantiels dans le domaine des nanotechnologies. Des nanotubes de carbone permettent de

¹¹ Ceci bouscule la distinction du normal et du pathologique comme l'avait souligné, en son temps, le philosophe et médecin Georges Canguilhem.

fabriquer des outils idéaux pour réparer des connexions cérébrales défectueuses, ou des circuits de la moelle épinière lésés lors d'un traumatisme. Des nano-électrodes en carbone remplacent aujourd'hui

les électrodes métalliques d'antan pour délivrer des courants électriques de faibles amplitudes grâce à un générateur d'impulsions électriques placé sous la peau. Les stimulations électriques cérébrales profondes s'avèrent très utiles pour soulager les personnes atteintes de dépressions résistantes aux traitements pharmacologiques ou présentant des troubles obsessionnels compulsifs. Grâce à son dispositif qui permet de délivrer les impulsions électriques au bon moment, cette approche suscite de nombreux espoirs pour traiter également des affections d'ordre neurologique, comme l'épilepsie ou la maladie de Parkinson. Cepen-

dant, délivrer du courant pour atteindre spécifiquement un amas de neurones n'est pas chose facile et l'électrothérapie s'accompagne parfois d'effets indésirables. Il est arrivé que des parkinsoniens recevant des stimulations électriques pour traiter leurs symptômes développent des troubles du comportement si sévères que leur entourage réclame l'abandon du traitement.

Outre l'électronique qui s'avère puissante pour modifier les grandes fonctions mentales, la génétique se révèle tout aussi redoutable dans sa panoplie d'outils transgressifs. Parmi les progrès génétiques qui permettent d'envisager de nouvelles possibilités d'intervenir de manière intrusive dans le cerveau, figure une technique très en vogue actuellement et qui se nomme CRISPR-Cas9 (*CRISPR* pour *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* et Cas9

L'espèce humaine s'est construite à partir d'une longue série d'accumulations d'erreurs, de mutations génétiques aléatoires et d'imperfections qui ont conduit à des modifications bénéfiques pour les humains. ”

pour *CRISPR associated protein 9*¹². Derrière cet acronyme barbare se cache en fait une puissante révolution technologique qui offre la possibilité de remplacer à loisir un gène par un autre, ou encore de corriger un gène altéré. Cette technique permet de lire le génome d'un organisme pour détecter et réparer les mutations qui ont pu s'y accumuler. Ces « ciseaux » moléculaires permettent en fait d'intervenir directement sur l'acide désoxyribonucléique (ADN), support moléculaire de l'information génétique, et de modifier à façon le génome, tel un éditeur qui expurge les « coquilles » d'un texte.

L'utilisation de CRISPR-Cas9 en Neurosciences permet d'accélérer les recherches visant à identifier les relations précises entre un gène et une fonction particulière. Sur le plan thérapeutique, cette technique de réécriture du génome ouvre la voie vers une réparation de gènes impliqués dans la genèse des souffrances mentales. À terme, il sera techniquement possible d'éliminer, de corriger ou de substituer un gène du cerveau, par ce scalpel moléculaire. Cependant, si cette performance devient possible, est-elle vraiment souhaitable ? Rappelons que l'espèce humaine s'est construite à partir d'une longue série d'accumulations d'erreurs, de mutations génétiques aléatoires et d'imperfections qui ont conduit à des modifications bénéfiques pour les humains. Cette démarche évolutive, chaotique et non-orientée, a permis l'émergence du plus extraordinaire et fascinant organe de l'humain, son cerveau. Vouloir corriger les imperfections du vivant pour réduire les spécificités humaines revient à refuser les incessantes innovations biologiques, véritable bricolage du vivant¹³. C'est un peu

12 CRISPR-Cas9 est un complexe moléculaire composé de deux éléments complémentaires : un brin d'ARN de séquence homologue à l'ADN que l'on veut exciser et une enzyme, l'endonucléase Cas9. Arrivé dans la cellule, le brin d'ARN se fixe à l'ADN ciblé et Cas9 se charge de couper la section d'ADN couplée au brin d'ARN. Des enzymes de réparation d'ADN viennent alors combler le vide laissé par l'ablation du fragment d'ADN.

13 Expression empruntée à François Jacob dans son ouvrage *Le Jeu des possibles*, Fayard, 1981. Dans un article princeps publié en 1977, il compare l'évolution des espèces à un bricoleur, recyclant et modifiant des pièces existantes, sans aucun but, sans plan ni téléonomie. Cette vision hérétique s'opposait alors au courant majoritaire de l'époque qui voyait l'évolution comme un projet déterminé ayant une finalité.

comme si un régime démocratique, devenu dictature, décidait de se défaire de ses artistes.

Ces nouveaux procédés, qui permettent d'interroger, puis d'intervenir directement sur le fonctionnement de circuits nerveux, avec le risque d'un détournement possible pour augmenter les performances mentales de sujets sains, soulèvent aujourd'hui un nombre important de questions éthiques qu'il n'est plus possible d'ignorer. Parcourons les prouesses technologiques qui nous menacent.

Un cerveau augmenté par la chimie

C'est en bordure de la Méditerranée que furent inventées des techniques d'enseignement pour augmenter les connaissances du peuple Grec. Lorsque Socrate développe une nouvelle façon de transmettre la connaissance, son but clairement affiché est d'optimiser les performances des élèves en améliorant leur pouvoir d'analyse, de synthèse, de critique, afin d'élever leur érudition. Quand les troupes romaines ont recours aux machines, et autres armes guerrières, c'est pour augmenter les performances de leurs soldats. La volonté d'augmenter le potentiel des individus est bien omniprésente depuis l'origine de notre histoire. Selon ce principe, il est facile d'accepter l'idée que la culture puisse nous améliorer, ou de porter des lunettes pour corriger une vision défaillante, puisque nous avons toujours eu recours à des interventions pour réparer les imperfections de la Nature.

Si ces « augmentation » suscitent peu d'objections éthiques ou morales, que faut-il penser du dopage chimique quand il vise à accroître l'efficacité du cerveau ? Des substances capables de doper l'intelligence ou la mémoire existent et un nombre croissant d'utilisateurs y ont déjà recours. Souvent, ces stimulants cognitifs sont des médicaments détournés de leur usage thérapeutique, comme ceux utilisés pour réduire la somnolence des narcoleptiques ou ralentir l'évolution de la maladie d'Alzheimer.

Parmi les stimulants cognitifs les plus fréquemment utilisés, figurent la nicotine, les amphétamines, le diméthylethanolamine (DMAE), ou les médicaments anticonvulsivants de la famille des racetams (Ani-

racetam, Oxiracetam, Pramiracetam, etc.). Dans un monde où la performance reste une valeur privilégiée, des forçats du travail, des étudiants et des loups de la finance tendent à remplacer progressivement l'alcool du soir ou la cocaïne du matin, au profit des stimulants cognitifs. Bref, le dopage cognitif est une béquille sur laquelle nombreux sont ceux qui cherchent à s'appuyer. Des études font état d'une augmentation de cinq cents pour cent de la consommation

de stimulants cognitifs, sur les dix dernières années.

Cet engouement se remarque notamment dans les domaines compétitifs de l'économie où la consommation massive de stimulants pour accroître les performances cognitives ressemble, à bien des égards, au dopage sportif des hautes compétitions. À l'instar des sportifs qui sont contrôlés régulièrement et parfois sanctionnés, faut-il



Des études font état d'une augmentation de cinq cents pour cent de la consommation de stimulants cognitifs, sur les dix dernières années. ”

regretter qu'aucune règle n'encadre cette pratique dans les milieux professionnels ? Pourquoi ce qui est condamnable dans le sport est-il toléré dans la sphère professionnelle ? Le recours aux stimulants cognitifs ne viole-t-il pas tout autant le principe moral de l'égalité des chances dans un contexte de compétition ?

Vers une version électrique de l'humain

Parce que l'introduction d'électrodes dans le cerveau reste une intervention hautement aléatoire, une méthode beaucoup moins invasive et plus précise, la stimulation électrique transcrânienne, est de plus en plus en vogue. Mise au point en 2006, cette technique permet de

doper les neurones en injectant de faibles courants électriques¹⁴ délivrés par des électrodes placées sur le cuir chevelu. Cette approche est utilisée par des sujets en bonne santé qui, comme avec l'usage de psychostimulants, souhaitent doper leur cerveau pour accélérer leur prise de décision, l'apprentissage d'une langue étrangère ou étendre leur mémoire. Cette méthode est également utilisée en neurologie pour soulager des douleurs chroniques, traiter des mouvements anormaux ou faire disparaître des acouphènes. En psychiatrie, elle permet de soigner les dépressions résistantes aux antidépresseurs et soulager les troubles de l'addiction.

En France, des protocoles de recherche sont en cours pour étendre ces indications et faciliter par exemple le sevrage tabagique, les troubles du sommeil, ou compenser le déclin cognitif des premières phases de la maladie d'Alzheimer.

Qu'elles soient chimiques ou électriques, ces améliorations cognitives font peser de lourdes menaces sur l'humanité. Une prophétie qui s'est malheureusement vérifiée lorsqu'on découvrit en 2015 que les combattants djihadistes sur le sol français avaient usé de substances psychoactives comme le Captagon¹⁵ pour annihiler leur douleur et décupler leur violence par le déclenchement d'un état euphorique associé à l'inhibition de la peur.

Dès lors qu'il s'agit de progrès des Sciences, est-il souhaitable de réaliser tout ce qui est techniquement possible ? Faut-il tolérer tout ce que les Sciences du cerveau offrent en matière de modification des facultés mentales ? De la mythologie de Prométhée ou Icare, jusqu'aux *blockbusters* du cinéma comme *Inception* ou *Lucy*, la volonté des humains de transcender les limites fixées par la Nature a toujours été très forte et quelques technologies transgressives permettent déjà de s'élever au-dessus de la contingence des lois naturelles. Parcourons

.....
14 L'intensité du courant électrique délivré est de l'ordre de 0,5 Ampère / m2 en séances répétées de 10 à 30 minutes.

15 Bien connu des chimistes, le fénétilline chlorhydrate est une amphétamine qui fut créée pour soigner les troubles de la concentration et la narcolepsie. Elle fait aujourd'hui l'objet d'un trafic intense dans les pays du Moyen-Orient.

quelques-unes de ces prouesses techniques pour lesquelles il est encore plus urgent de réfléchir.

Le mythe du cerveau renforcé

La biotechnologie offre chaque jour de nouveaux outils toujours plus sophistiqués et les moyens d'intervenir pour réparer le cerveau se diversifient. Des cellules souches à la thérapie génique et aux biomatériaux, ces techniques apparaissent comme autant de promesses pour traiter les maladies neurologiques, même si aujourd'hui toutes

se heurtent, peu ou prou, à des obstacles qui retardent leur usage thérapeutique. Par exemple, des biophysiciens ont mis au point un cheval de Troie que l'on nomme nanosphère, constituée de polymères solides qui renferment l'agent pharmacologique souhaité. Une fois administrée dans le sang, ces nanosphères pénètrent le cerveau pour délivrer spécifiquement l'agent chimique.

D'autres espoirs se portent



En forçant les cellules adultes à retrouver un stade embryonnaire, grâce à l'introduction de quelques gènes clés, une véritable machine à remonter le temps fut inventée ”

vers la biologie cellulaire et plus particulièrement vers les cellules souches et leur aptitude particulière à promouvoir la régénération des tissus cellulaires. La révolution dans ce domaine se produit en 2007 lorsque le japonais Yamanaka, prix Nobel obtenu en 2012 avec le britannique Gurdon, démontre qu'il est possible de reprogrammer des cellules. En forçant les cellules adultes à retrouver un stade embryonnaire, grâce à l'introduction de quelques gènes clés, une véritable machine à remonter le temps fut inventée. En introduisant ces gènes dans des cellules de la peau, des biologistes ont réussi à transformer des cellules du derme d'une femme âgée de quatre-vingt-deux ans, victime de sclérose latérale amyotrophique,

en cellules pluripotentes capables de fournir indéfiniment dans des éprouvettes des neurones sur lesquels la maladie peut être étudiée, et l'efficacité des médicaments testée avant de traiter la patiente. Cette approche ouvre la voie vers une nouvelle médecine personnalisée où à partir d'une simple cellule dérivée de la peau, il est désormais possible de préciser, spécifiquement, quelle sera la meilleure combinaison possible de médicaments et à quelle dose ils devront être administrés.

Corriger un défaut de comportement par la génétique, la chimie, l'électricité, ou par voie psychique, soulève la question de la nature humaine, de l'identité propre de chaque individu, et en particulier l'expression de son libre arbitre¹⁶. Synonyme de liberté, ce dernier principe désigne le pouvoir absolu de choisir l'origine, et éventuellement les conséquences, de nos actes¹⁷. Le libre arbitre présuppose que nous puissions contrôler nos actions, nos pensées et même nos émotions. Le philosophe de Francfort, Arthur Schopenhauer, insiste sur les fondements ontologiques de l'humain qui repose sur ce principe : « Ma volonté ne dépend absolument que de moi seul ! Je peux vouloir ce que je veux : ce que je veux, c'est moi qui le veux »¹⁸. Mais le philosophe nuance sa pensée et précise que l'action de chacun reste quand même sous l'influence d'une part de l'essence même du moi qui reste immuable, d'autre part des motifs qui sont extérieurs à l'humain et sur lesquels il n'a aucune prise : « L'homme est un être déterminé une fois pour toutes par son essence, possédant comme tous les autres êtres de la nature des qualités individuelles fixes, persistantes, qui déterminent nécessairement ses diverses réactions en présence des excitations extérieures ».

16 Ce concept s'oppose au déterminisme. Il a été très largement débattu par les théologiens, puis par les philosophes. Saint-Augustin (354-430) fut l'un des premiers à chercher à définir ce concept.

17 Dans *L'Éthique*, Spinoza, grand penseur du principe de causalité, décrit un monde déterminé, uniquement dicté par les lois de la nature, dans lequel le libre arbitre n'est qu'une illusion de l'esprit.

18 Arthur Schopenhauer, *Essai sur le libre arbitre*, trad. S. Reinach, 1894.

Les découvertes récentes fournissent des données surprenantes sur la nature même de ce libre arbitre et conduisent les scientifiques à pénétrer le champ de la philosophie. En stimulant des neurones par l'électricité et en mesurant l'activité de neurones particuliers du cerveau humain, il est possible d'observer qu'une activité cérébrale spécifique précède non seulement l'action, mais aussi la volonté d'agir. Il est possible de décoder neurologiquement les principes biologiques qui permettent au libre arbitre de s'exprimer, voire de

le prédire à partir de l'activité neuronale, avant même que le sujet sache qu'il veut agir¹⁹.

En démontrant le caractère essentiellement déterministe du libre arbitre, cette découverte fit l'effet d'une bombe en sciences humaines, philosophie, psychologie, droit et sciences politiques.

Cette découverte lançait également deux nouveaux défis particulièrement importants. D'une part, en montrant comment le contrôle mental, voire la prédiction

mentale, s'opèrent dans nos circuits nerveux, cette découverte permet d'envisager comment améliorer la qualité de vie de certaines personnes en opérant une fusion de la pensée aux machines par le truchement d'interfaces cerveau-machine. D'autre part, la notion de responsabilité individuelle est nécessairement revisitée par les découvertes qui révèlent l'existence d'une activité cérébrale préconsciente et qui démontrent le schéma déterministe, au moins dans la phase d'initiation, d'une décision. Où commence la responsabilité d'un individu lorsque ses neurones engagés dans un choix

Où commence la responsabilité d'un individu lorsque ses neurones engagés dans un choix conscient se sont activés une ou plusieurs secondes auparavant, par contingence et non par choix ? ”

19 Cette manifestation de l'action volontaire, la volition, s'oppose à la notion de réflexe.

conscient se sont activés une ou plusieurs secondes auparavant, par contingence et non par choix ?

Il est indispensable de redéfinir des règles éthiques et morales à l'aune de ces découvertes sur le libre arbitre, mais également celles qui concernent les processus de construction mentale et celles qui bousculent la notion de véracité de nos souvenirs. L'optogénétique, mariage de l'optique avec la génétique, vient récemment de montrer combien nous devrions rester prudents sur l'interprétation des souvenirs. Des chercheurs du MIT ont fourni la preuve qu'il est possible d'associer artificiellement deux événements distincts dans le temps et dans l'espace pour créer un faux souvenir. Cette technique permet de montrer aussi que deux souvenirs désagréables, l'un vrai et l'autre faux, peuvent coexister et donc qu'un souvenir artificiel peut très bien rivaliser avec un souvenir authentique. Bien avant cette expérience, rappelons que les psychanalystes avaient déjà postulé l'existence de ces processus mentaux par la notion de compétition.

Sur le même registre de la manipulation mentale, des chercheurs ont implanté une lampe à diode électroluminescente (LED) dans le cerveau de souris pour stimuler une région cérébrale dite « zone du plaisir » qui s'active transitoirement dès qu'un sujet reçoit une gratification. Lorsque les chercheurs délivrent dans le cerveau des souris des récompenses virtuelles – sous la forme de flash lumineux – au moment où les souris pénètrent dans une pièce particulière, ils trompent ainsi les rongeurs qui, croyant avoir été réellement récompensés, apprennent rapidement à retrouver puis résider dans cette « chambre du plaisir ». Une expérience mentale, même déconnectée d'un vécu réel, semble donc capable de déclencher du plaisir. Voici une découverte qui ravira les adeptes de pratiques méditatives pour qui les représentations mentales de notre vie intérieure sont aussi riches, parfois même meilleures, que celles fournies par notre confrontation au monde extérieur.

Quel avenir réservons-nous à l'Humanité?

Nous sommes confrontés à un changement radical de civilisation. Notre identité jusqu'à présent fondée sur notre cerveau (« Je pense, donc je suis »), se trouve menacée. Un continuum se forme désormais entre le cerveau biologique, l'intelligence artificielle et autres avatars dérivés des Sciences cognitives. Aujourd'hui, les objets connectés se comportent comme des extensions de notre corps et de notre esprit, ils servent déjà d'assistants neuronaux pour nos appuis mentaux.

À terme, on peut prévoir une fusion de l'intelligence artificielle avec l'intelligence « biologique ». Dans ce cas, il s'agirait d'une innovation de rupture que nous n'aurions pas su prévoir. Le tsunami technologique auquel nous assistons demande des réponses économiques, morales, éthiques... et malheureusement rien n'est prêt. C'est un choc à la fois technologique et psychologique, marqué par la conjonction temporelle de quatre événements : le développement des GAFAM (Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft), l'application des technologies dites de la convergence que l'on nomme NBIC (pour nanotechnologies, biotechnologies, informatique et cognitive), de l'idéologie posthumaniste qui règne dans la Silicon Valley et enfin de l'émergence de la zone Asie Pacifique comme acteur nouveau de la mondialisation.

Les NBIC convergent et progressent de plus en plus rapidement car les découvertes dans un domaine activent, puis servent, les recherches d'une autre discipline. Cette synergie décuple la puissance des recherches et permet des avancées spectaculaires, parfois inattendues. Une certaine médecine utilisant toutes les armes NBIC est déjà en route pour qu'*Homo sapiens* devienne la première espèce « affranchie », libérée ainsi des incertitudes de la sélection darwinienne. Pour les technophiles, nous ne serions plus les jouets d'un tri accompli par des forces de sélection aveugles, mais les décisionnaires et véritables sélectionneurs actifs des attributs de notre humanité. L'homme biotechnologique aurait toutes les cartes en main pour « s'arracher à la nature ».

Derrière la convergence NBIC, une philosophie de transformation radicale de l'Humanité – le Transhumanisme – s'est mise en route.

Les potentialités technologiques sont illimitées et soulèvent naturellement des craintes. De la confrontation entre bio-progressistes et bio-conservateurs dépendra ce que nous deviendrons. Mais derrière le Transhumanisme, qui rêve de changer l'Homme, se profile le Posthumain : Transhumain augmenté par l'hybridation avec des circuits électroniques et doté de l'Intelligence Artificielle. Et le posthumanisme pourrait sonner le glas de l'humanité.

Posthumain : Transhumain augmenté par l'hybridation avec des circuits électroniques et doté de l'Intelligence Artificielle. ”

Si ces questionnements du Vivant ne sont pas nouveaux, jamais nous n'avons atteint une telle ampleur disruptive due à la puissance des nouvelles techniques qui permettent d'observer les organismes vivants jusqu'aux molécules à l'intérieur de leurs cellules, d'analyser et manipuler leur ADN au point de pouvoir synthétiser un génome complet, de croiser les milliards d'informations du « *big*

data », de voir fonctionner le cerveau de l'homme conscient, et de le modifier à façon. Cette nouvelle ère qui s'ouvre à nous impose de débattre sur des sujets les plus chargés de signification, comme l'origine de la vie, la maladie et le propre de l'homme : sa pensée et sa conscience de soi ou d'autrui.

Rêvons d'une Science redevenue ouverte et citoyenne

Le développement scientifique est alimenté par deux courants – schématiquement la curiosité et l'utilitarisme – qui se combinent, depuis les origines des Sciences, en proportions variables selon les époques. Au commencement, l'homme préhistorique s'est attaché à étudier le monde vivant pour résister à ses contraintes et en tirer le meilleur bénéfice. Cultiver les plantes, élever les animaux, les sélectionner pour améliorer leurs qualités nutritives, les domestiquer, relèvent bien d'approches scientifiques faisant appel à l'observation et à l'expérimentation. Dans ces temps anciens, c'est avec la volonté

d'améliorer sa survie en exploitant la Nature que l'homme accumula et transmet des connaissances sur le monde vivant dans lequel il évoluait. L'humanité a donc inauguré une Science biologique dans sa version utilitaire.

Avec l'Antiquité, se développent deux approches motivées par la soif des hommes de comprendre leur environnement. Portée par la curiosité, c'est d'abord l'invention de l'histoire naturelle qui vise à inventorier et décrire le monde vivant. La seconde est celle de la physiologie animale et humaine, qui s'appuie sur une démarche expérimentale hypothético-déductive visant à comprendre les grandes fonctions des êtres vivants, et qui sert de socle au développement de la médecine expérimentale.

Les deux moteurs, curiosité et utilitarisme, ont animé de concert les Science du Vivant, mais depuis la fin du XIX^e siècle, force est de constater que c'est une représentation de la biologie comme source d'outils technologiques et d'applications qui prédomine.

Nos sociétés contemporaines attendent des Sciences des remèdes et des bénéfiques aux maux et menaces dont elles souffrent. La pandémie de la Covid-19 nous le rappelle cruellement. Le tournant du XXI^e siècle salue l'utilitarisme des Sciences du cerveau. Il le salue à tel point que les projecteurs médiatiques éclairent surtout les avancées qui sont porteuses de remèdes ou de retombées économiques immédiates, laissant dans l'ombre de grandes découvertes, non planifiées, non programmées, issues de la seule curiosité des chercheurs. Ces découvertes, dont les applications ne sont pas perceptibles au moment où elles jaillissent, sont telles qu'elles impriment aujourd'hui un véritable tournant à la connaissance du Vivant, et plus particulièrement du cerveau. Il est important de faire découvrir cette face des Sciences qui échappe aux radars médiatiques, en espérant surprendre nos concitoyens, les émerveiller, et éventuellement les faire se prendre de passion pour les questions palpitantes et porteuses d'avenir qu'elles engendrent.

On ne saurait apprécier les tournants actuels des Sciences du cerveau sans rappeler la contribution majeure des innovations scientifiques totalement fortuites. Les avancées colossales des Neurosciences

sont liées, non seulement aux fantastiques évolutions des techniques d'imagerie qui nous donnent à voir en action le cerveau de l'homme vivant, mais aussi à l'opportunité d'études uniques des cerveaux de patients. Dans l'histoire des sciences, c'est la première fois que l'on peut décrypter biologiquement les fonctions cognitives du cerveau humain en activité : « l'homme neuronal » devient accessible. L'interface entre neurobiologistes et chercheurs en Sciences humaines et sociales devient possible pour accéder à la compréhension des fonctions cognitives du cerveau humain, selon une véritable démarche holistique. Il est par exemple fascinant de prendre conscience que les progrès des Sciences cognitives sont utilisables quasi immédiatement par le monde éducatif ou médical.

Dans l'histoire des sciences, c'est la première fois que l'on peut décrypter biologiquement les fonctions cognitives du cerveau humain en activité : « l'homme neuronal » devient accessible."

Derrière ce tour d'horizon, se profile une question de fond : que peut-on attendre des Sciences du cerveau dans ce siècle naissant ? Comment un pays comme le nôtre, riche de tels acquis, doit-il prendre en compte ces formidables avancées ? Les deux ingrédients déjà évoqués – la curiosité et l'utilitarisme – vont naturellement concourir au développement des Sciences du cerveau. L'enjeu est qu'ils se combinent de manière équilibrée pour que l'un ne domine par l'autre. Ces deux types de recherche doivent être convenablement identifiés pour pouvoir être interconnec-

tés par des échanges permanents, motivés par l'opportunité scientifique de leurs découvertes réciproques. Là est la clé des applications de demain, celles qui répondront aux enjeux socio-économiques de notre futur. L'histoire nous montre que les découvertes reposent sur deux actions. Soit sur une connaissance déjà acquise, dont on peut raisonnablement prévoir l'évolution, et creuser ce sillon préexistant pour le développer. Il s'agit là d'une approche nécessaire, qui s'inscrit aisément dans de grands programmes qui

permettent de mobiliser les recherches identifiées par le politique. Nous avons cité ces grandes initiatives mondiales dans le domaine des Sciences du cerveau. Mais l'histoire nous enseigne aussi que cette approche ne suffit pas. Si l'homme s'était consacré exclusivement à l'amélioration de la hache de pierre, nous ne serions jamais passés à l'âge de bronze. Une seconde approche permet de produire les innovations peut-être les plus intéressantes, les innovations dites de rupture, celles qui sont généralement issues de découvertes qui n'avaient pas été prévues, mais portées par la curiosité et *a priori* sans aucune application visible.

Gardons-nous de nous enfermer exclusivement dans les voies d'une recherche entièrement programmée ciblant des résultats à des échéances trop courtes par rapport au temps de la recherche. Allons explorer l'inconnu, guidés par la curiosité de découvrir les richesses qu'il contient, certes, mais munis d'un esprit éclairé de valeurs éthiques. C'est non seulement un gisement pour l'innovation de



Pour explorer les terres inconnues, la recherche a besoin de temps, de prise de risque, d'imagination, de créativité, de liberté, mais aussi de guides moraux. ”

demain, mais aussi la source de connaissances nécessaires à des sociétés intelligentes, conscientes et responsables du monde dans lequel elles évoluent et qu'elles transforment pour esquisser un futur souhaitable. Pour explorer les terres inconnues, la recherche a besoin de temps, de prise de risque, d'imagination, de créativité, de liberté, mais aussi de guides moraux. Ce sont les conditions d'une Science qui ne veut pas se restreindre à être utilitaire, mais qui est par essence inéluctablement utile. Or, ce rôle des Sciences du cerveau n'est pas que dans les mains des chercheurs qui les servent, il ne sera assumé qu'en fonction d'une volonté politique et d'un consensus social qui devrait conduire vers une Science ouverte et plus citoyenne. Pour cela, gageons que des efforts seront rapidement fournis pour élever

le niveau d'éducation en Sciences, et plus particulièrement renforcer la dimension épistémologique qui fait tant défaut.

En livrant un aperçu des avancées en Sciences du cerveau, des enjeux qu'elles suscitent, des perspectives qu'elles ouvrent et des craintes qu'elles génèrent, la communauté des chercheurs en Sciences du cerveau espère donner à leurs citoyens le goût et l'intérêt des lois naturelles, et par là même les instruments d'une implication active de leur part en suscitant leur curiosité. Les Sciences du cerveau ont besoin de leur concours, de leur soutien, pour que le fruit des recherches ne serve plus uniquement à l'essor des GAFAM et autres consorts transhumains. Rappelons que c'est le futur de notre cerveau qui en dépend...