

dans diverses directions. Lors de certains essais, l'ensemble des points était coloré de la même couleur (en vert, en rouge ou en bleu), et l'on demandait parfois aux sujets de rapporter cette couleur. Une information ignorée des sujets était que deux des trois couleurs étaient associées à la direction, c'est-à-dire à la réponse à fournir, tandis que la troisième était sans lien avec la direction. Il y avait donc un moyen très simple (observer la couleur) pour que les participants améliorent leurs performances dans ce test par ailleurs très difficile.

Or dans ces expériences, aucun sujet n'a déclaré avoir pris conscience du lien entre couleurs et réponses, mais les résultats montraient qu'ils avaient tous peu à peu appris (inconsciemment) l'association entre les deux. Si les sujets n'ont pas pris conscience de ce lien, c'est peut-être parce que la présence des couleurs était décrite aux participants comme une autre tâche, sans rapport aucun avec la première.

Que conclure de ce bref tour d'horizon ? Face aux phénomènes de cognition inconsciente – de la perception subliminale à l'apprentissage implicite –, deux attitudes sont possibles. On peut tout d'abord nier en bloc l'existence de ces phénomènes et considérer que tout ce qui fait partie de notre vie mentale est nécessairement conscient. Bien que cette perspective paraisse peu plausible, certains chercheurs la défendent avec force, épinglant non sans raison les nombreuses incertitudes méthodologiques qui continuent d'empoisonner le domaine, et attribuant donc les résultats observés à l'utilisation de mesures peu sensibles ou à l'influence de facteurs insuffisamment contrôlés. S'il est indéniable que le cerveau est capable de traiter des informations sans conscience, comme le prouve la vision aveugle, l'existence de telles capacités n'implique en rien l'existence d'un inconscient cognitif au sens fort ; autrement dit, on peut toujours considérer que de telles capacités relèvent non pas de la cognition, mais de simples facultés neurales, automatiques en quelque sorte.

L'autre attitude consiste à reconnaître que certains contenus, sémantiques par exemple, peuvent être traités sans conscience. Mais se pose alors la question toujours non résolue de savoir quelles sont les limites de cet inconscient cognitif. Sur la base des données existantes, on peut sans doute répondre que si de tels traitements sans conscience existent bel et bien, ils sont éphémères, superficiels et en général sans effets sur le comportement. Il y a donc peu de raisons de s'inquiéter de la possibilité que nous soyons manipulés. Il est sans doute beaucoup plus simple de manipuler la conscience par la persuasion ou la suggestion que de manipuler directement notre inconscient. Si iceberg il y a, il faut penser ses profondeurs immergées comme le fondement neural de la conscience plutôt que comme une partie cachée de notre vie mentale.

Une façon d'avancer dans ce débat est de considérer que la frontière entre conscient et inconscient est fluide et susceptible d'être profondément modifiée par des processus d'apprentissage et de plasticité prenant cours tout au long de la vie.

UNE FRONTIÈRE FLUIDE ENTRE CONSCIENT ET INCONSCIENT

Considérons par exemple la conduite automobile. Aux efforts intentionnels et conscients des débuts se substitue progressivement un ensemble d'actions automatisées qui prennent place avec tellement de fluidité que le conducteur expert peut sans difficulté entretenir une conversation avec son passager tout en maintenant la voiture sur la route. La conscience, dans un tel cas, sans être totalement absente, semble être devenue optionnelle. Mais il s'agit là d'une situation fort différente de celle qui intéresse la perception subliminale. Il s'agit donc de repenser les rapports entre conscient et inconscient d'une manière qui reflète le fait que la conscience que nous avons du monde est un phénomène dynamique, à différentes échelles temporelles. Un peu à la manière d'une rivière dont le cours modifie son propre lit au fil du temps, l'automatisation modifie elle aussi les contours de l'espace mental dans lequel prend place notre activité.

Une autre façon de faire avancer le débat consiste à continuer à développer les techniques permettant de visualiser et de quantifier l'activité cérébrale. L'imagerie cérébrale, et en particulier certaines méthodes d'analyses permettant de « décoder » l'activité du cerveau, offrent aujourd'hui de fascinantes possibilités d'explorer les relations entre traitement inconscient et conscience.

Ainsi, Vincent Taschereau-Dumouchel, de l'Institut international de recherche sur les télécommunications avancées, à Kyoto (Japon), et ses collègues ont montré en 2018 qu'il était possible d'amener des patients souffrant d'arachnophobie à réduire leur anxiété en leur demandant tout simplement de tenter de contrôler par la pensée la taille d'un cercle présenté sur un écran tandis que leur activité cérébrale était enregistrée. Ce que les sujets ignoraient, c'est que la taille du cercle était déterminée à chaque instant par un algorithme capable d'identifier en temps réel dans leur cerveau la présence d'une configuration d'activité neurale caractéristique des araignées... Autrement dit, par cette méthode de neuro-rétroaction élaborée, il est aujourd'hui possible de contrôler intentionnellement l'activation inconsciente de représentations arbitraires. De telles méthodes permettront sans doute de mieux cerner l'inconscient... mais aussi de mieux comprendre les mécanismes de la conscience elle-même. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Alamia et al., **Unconscious associative learning with conscious cues**, *Neuroscience of Consciousness*, pp. 1-10, 2016.

A. Cleeremans, **Connecting conscious and unconscious processing**, *Cognitive Science*, vol. 38(6), pp. 1286-1315, 2014.

S. Dehaene et al., **Conscious, preconscious, and subliminal processing : a testable taxonomy**, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 10(5), pp. 205-211, 2006.

L. Naccache, **Le Nouvel Inconscient**, Odile Jacob, 2006.

J. R. Searle, **La Redécouverte de l'esprit**, Gallimard, 1995.



L'ESSENTIEL

> Quand nous ouvrons les yeux le matin, nous devenons conscients de ce qui nous entoure. Les scientifiques cherchent à caractériser les processus cérébraux associés à cet état mental particulier.

> La neuro-imagerie révèle que dans le cerveau conscient, différentes aires de cet organe

entretiennent un dialogue à distance, à la fois dense et synchrone.

> La prise de conscience d'un stimulus s'accompagne aussi de certaines manifestations corporelles. Ces liens de la conscience avec le corps ou avec l'environnement restent à étudier.

L'AUTEUR



LIONEL NACCACHE
neurologue et chercheur
en neurosciences cognitives
à l'Institut du cerveau et
de la moelle épinière, à Paris

Observer la conscience

Comment le cerveau humain devient-il conscient d'une information visuelle, auditive ou autre ? Grâce notamment aux techniques d'imagerie cérébrale, les neurobiologistes comprennent mieux aujourd'hui ce qui caractérise la conscience et ses rouages.

L'une des questions fondamentales des neurosciences est de déterminer les relations entre le cerveau et la pensée. Le cerveau « produit-il » l'esprit, ou ce dernier est-il une propriété immatérielle de cet objet matériel branché sur le corps et sur le monde ? Certes, la définition de ce qu'est l'esprit reste en soi une recherche relevant de disciplines croisées. Mais il est clair que la conscience y prend une part importante. Or, ces dernières années, les progrès des neurosciences ont fait naître la possibilité d'observer la conscience dans le cerveau. Ou, plutôt, de repérer des caractéristiques neuronales propres à nos états conscients, qui permettraient de repérer ces derniers par la mesure expérimentale.

SE Doter d'une définition de la conscience

Avant toute chose, il est indispensable de se doter d'une définition de la conscience qui nous permette de délimiter rigoureusement ce dont il sera question. Il est possible de définir la conscience comme notre capacité à nous

rapporter subjectivement nos propres états mentaux, à la manière de ce que nous affirmons quotidiennement : « Je vois ce visage ; j'entends cette voix ; je me souviens de ce coucher de soleil ; je suis en train de me brosser les dents... » Le néologisme « rapportabilité » offre une définition de la conscience dont la spécificité ne fait pas débat : l'immense majorité sinon la totalité des théoriciens de la conscience partagent l'idée que la conscience est nécessaire pour la rapportabilité.

Il est également important de noter que cette rapportabilité interne ne se limite pas à la communication verbale, mais qu'il est possible de la recueillir de manière non verbale chez des bébés, des patients aphasiques (incapables de parler), mais également chez d'autres espèces animales, par exemple chez le macaque. Il s'agit donc d'une capacité à accéder subjectivement à nos propres expériences, à nous les représenter d'une façon ou d'une autre.

Forts de cette définition, il devient possible de bâtir un programme scientifique afin de répondre à deux questions : premièrement, quelles sont les conditions cérébrales ➤

> nécessaires et suffisantes à un état conscient, c'est-à-dire à la possibilité de se rapporter ses propres états mentaux, indépendamment de leur contenu? Deuxièmement, quel est le scénario cérébral de la prise de conscience, autrement dit la suite d'événements neuronaux qui aboutissent à la création d'un état conscient?

Être conscient requiert deux conditions absolument nécessaires. Tout d'abord, le cerveau doit être dans un mode d'éveil, c'est-à-dire que les vastes ensembles de neurones du cortex cérébral doivent être activés. Cette première condition repose sur un réseau de régions sous-corticales qui composent la formation réticulée et qui naissent dans le tronc cérébral (voir l'encadré ci-dessous).

Le tronc cérébral est la structure du système nerveux central située immédiatement au-dessus de la moelle épinière. La formation réticulée y naît, et se prolonge jusqu'au thalamus (un gros noyau gris qui appartient aux ganglions de la base) et jusqu'à d'autres noyaux voisins (tels que le noyau basal de Meynert). Comme le neurologue d'origine portugaise Antonio Damasio l'a très bien décrit en 2001, la formation réticulée reçoit en permanence des informations en provenance du monde extérieur et du corps. Dès qu'elle détecte une menace potentielle dans l'environnement ou un déséquilibre du «milieu intérieur», elle éveille le cortex situé au-dessus d'elle afin de solliciter des solutions stratégiques et élaborées pour assurer ce que l'on appelle, depuis le XIX^e siècle avec Claude Bernard, l'homéostasie – le maintien des fonctions physiologiques, comme le maintien de la glycémie ou de l'acidité des fluides internes autour de valeurs optimales.

IL NE SUFFIT PAS D'ÊTRE ÉVEILLÉ POUR ÊTRE CONSCIENT

Chaque fois que nous sommes conscients, nous sommes aussi éveillés: l'éveil est nécessaire à la conscience! Et les rêves, me direz-vous? Ne sont-ils pas d'authentiques expériences conscientes au cours desquelles nous nous rapportons ce que nous vivons? De sorte qu'une fois éveillés, nous parvenons à nous remémorer certains de ces épisodes qui nous semblent alors très bizarres... Ainsi, les rêves ne sont-ils pas des états de conscience sans éveil?

Non, car en réalité, la plupart des rêves surviennent lors d'un état très paradoxal, découvert dès les années 1950 par le neurobiologiste français Michel Jouvet: vu de l'extérieur, le dormeur n'a nullement l'air éveillé, mais son cerveau vient en fait d'être réactivé par sa formation réticulée. On parle de «sommeil paradoxal» (REM-sleep en anglais, ce qui signifie «sommeil à mouvements oculaires rapides»), qui correspond donc à un état

d'éveil cortical autorisant l'expérience consciente. Notons toutefois que certains rêves surviennent lors d'autres périodes du sommeil, et que leur mécanisme constitue un sujet de recherche très actif, exploré à la fois par les neuroscientifiques, mais également par des chercheurs en sciences humaines tels que le sociologue Bernard Lahire. Durant le sommeil lent profond, il semble que nous ne rêvions que lors de périodes instables caractérisées par des réveils partiels et transitoires du cortex, ce qui semble ainsi en accord avec ce premier principe: la conscience requiert un niveau d'éveil minimal.

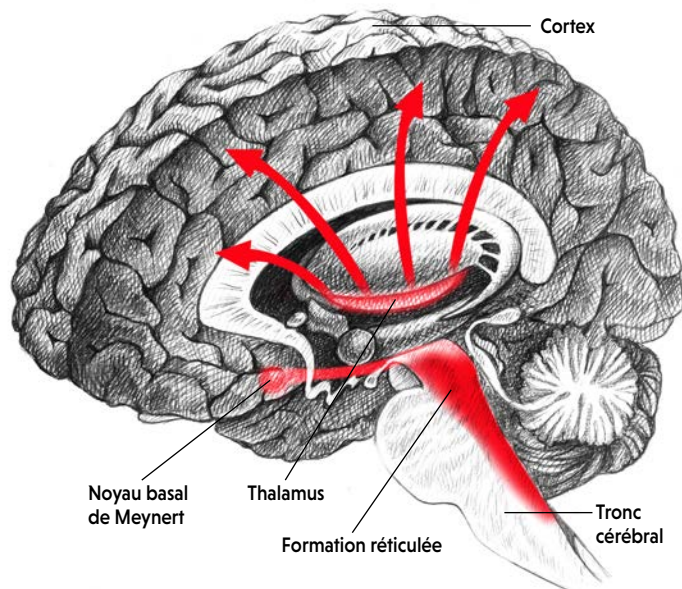
UNE « CONVERSATION NEURONALE » PARTICULIÈRE

Pour autant, être éveillé ne suffit pas. Lors de certaines crises d'épilepsie, un malade peut rester éveillé, garder ses yeux ouverts, se tenir debout avec un tonus postural d'éveil, voire même s'engager dans des activités motrices automatiques... mais il n'est conscient ni de lui-même ni de l'environnement. Autrement dit, il existe des états d'éveil sans conscience. Dans un registre plus dramatique, les états dits végétatifs illustrent la même dissociation: un éveil sans conscience de soi ni de l'environnement.

S'il ne suffit ainsi pas d'être éveillé pour être conscient, quel est l'indispensable >

AU FOND DE NOTRE CERVEAU

Notre niveau de conscience est modulé par l'activité d'une structure nerveuse enfouie dans le tronc cérébral et nommée formation réticulée. Alimentée en permanence par des informations sensorielles (auditives, visuelles, tactiles...), elle module, avec le noyau basal de Meynert, l'activité de centres supérieurs tels que le thalamus ou le cortex, créant les conditions nécessaires pour que nous soyons conscients de nous-mêmes et de ce qui nous entoure.



CONSCIENCE: UN PROBLÈME « FACILE » ET UN AUTRE « DIFFICILE »

La question de la conscience, objet de réflexions depuis l'Antiquité au moins, souffrait souvent de confusions, par exemple entre conscience perceptive, conscience de soi et conscience morale. Avec le développement de la psychologie expérimentale puis des neurosciences, dans les années 1980-1990, les notions sont devenues un peu plus précises.

La conscience est un état psychique où l'individu a une expérience subjective, où il « ressent » quelque chose, par exemple une couleur, un son, une odeur... La difficulté de définir la conscience avec précision est justement liée au caractère subjectif du « ressenti ». L'expérience subjective est en effet un phénomène mental propre au sujet et incommunicable en tant que tel à autrui : on devine ce que ressent autrui ou on en prend connaissance (partiellement) grâce à la communication verbale, mais on ne l'éprouve pas soi-même. De plus, qui dit conscience dit aussi esprit, et c'est alors toute l'énigme de la nature de l'esprit et de ses rapports avec la matière qui surgit.

En neurosciences, les chercheurs adoptent une définition opératoire de la conscience, qui se prête aux observations et aux expérimentations. Il en est ainsi de celle utilisée par Lionel Naccache dans son article ci-contre, où la conscience est vue comme « notre capacité à nous rapporter subjectivement nos propres états mentaux ». Une telle définition étant donnée, la démarche des neurosciences est ensuite d'explorer ce qui se passe physiquement dans le cerveau humain lorsque le sujet est conscient. En d'autres termes, les neuroscientifiques étudient les « corrélats neuronaux de la conscience », question que les philosophes nomment parfois le « problème facile de la conscience ».

C'est cette étude des corrélats neuronaux de la conscience qui a conduit à la théorie de l'« espace de travail neuronal global » développée par Stanislas Dehaene, Lionel Naccache et d'autres. Elle a aussi conduit à une autre théorie, plus ambitieuse mais aussi plus spéculative et plus minoritaire, dite de l'information intégrée, proposée en 2004 par Giulio Tononi, de l'université du Wisconsin à Madison, aux États-Unis, et développée

notamment avec Christof Koch, de l'institut Allen de science du cerveau, également aux États-Unis.

Cette théorie prend comme point de départ la conscience et ses propriétés essentielles, et cherche à en déduire les propriétés causales que devrait vérifier son substrat physique. La théorie de l'information intégrée définit ainsi une quantité notée Φ , qui mesure l'« information intégrée » d'un système physique et qui traduirait son degré de conscience : plus la valeur de Φ est élevée, plus il y aurait conscience.

Selon Giulio Tononi et les tenants de sa théorie, celle-ci permet non seulement d'aider à déterminer si des patients qui semblent dans le coma sont conscients ou non, mais aussi à répondre à d'autres questions de nature plus fondamentale, comme savoir si un animal donné ou un robot, voire un objet plus simple, est doté d'une forme de conscience.

Cependant, ni la théorie de l'espace de travail neuronal global ni la théorie de l'information intégrée ne répondent à une interrogation essentielle qui constitue « le problème difficile de la conscience » : comment un système physique comme le cerveau humain engendre-t-il un phénomène mental (non physique) et subjectif tel qu'une perception consciente ? Pour la plupart des philosophes de l'esprit, il y a là un fossé explicatif et ils ne voient pas comment des modèles neurobiologiques, aussi complexes soient-ils, pourraient le combler. Certaines tentatives de résoudre la difficulté s'appuient sur une démarche de type matérialiste. Il en est ainsi des thèses du philosophe américain Daniel Dennett. Vivement critiquées par d'autres philosophes tels que les Américains John Searle ou Thomas Nagel, elles prétendent démystifier la question de la conscience et la débarrasser des « illusions » à son sujet, le « problème difficile » en faisant partie.

Pour Daniel Dennett, la conscience est un phénomène qui résulte du traitement de l'information effectué par le cerveau, un phénomène biophysique « au même titre que le métabolisme, la reproduction ou l'autoréparation ». Une autre approche, plus marginale, est celle du mathématicien et physicien britannique Roger Penrose, selon qui l'émergence de la conscience est due à des phénomènes quantiques se déroulant dans les microtubules des neurones cérébraux.

Pour l'Australien David Chalmers, un autre éminent philosophe de l'esprit, la solution au problème difficile de la conscience passe par une forme de dualisme matière-esprit ou de panpsychisme : considérer que la conscience est une entité aussi fondamentale que le sont l'espace et le temps en physique, et qu'elle pourrait être universelle, présente un peu partout.

Malgré le renouveau des travaux scientifiques et des réflexions sur la conscience depuis les années 1980, il semble que le « problème difficile » soit encore bien loin d'une solution. Dommage, car il conditionne les réponses à nombre de questions d'ordre éthique ou existentiel : la crevette ou la poule que je m'apprête à manger a-t-elle souffert ? Pourquoi suis-« je » né dans ce corps plutôt que dans un autre ? À cette date plutôt qu'une autre ? Y a-t-il quelque chose après la mort ? Etc.

MAURICE MASHAAL
Pour la Science

- G. Tononi et C. Koch, **Consciousness : here, there and everywhere ?**, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 370, article 20140167, 2015.
- D. Chalmers, **L'Esprit conscient**, Ithaque, 2010.
- J. Kim, **Philosophie de l'esprit**, Ithaque, 2008.
- D. Dennett, **La Conscience expliquée**, Odile Jacob, 1993.



> ingrédient cérébral supplémentaire? Un cerveau conscient n'est pas simplement un cerveau éveillé; c'est également un cerveau qui est le siège d'une conversation neuronale très particulière opérant entre des régions distantes du cortex.

Cette structure de notre cerveau est, rappelons-le, constituée d'une mosaïque d'aires dévolues à des fonctions aussi différentes que la vision, le toucher, l'intégration d'informations sur notre environnement social, la perception des visages, l'audition, la planification de l'avenir, etc.

Lorsque nous sommes conscients, différentes aires du cortex, parfois distantes de plusieurs centimètres (une distance considérable à l'échelle des cellules de notre corps), conversent les unes avec les autres d'une façon bien particulière. Elles le font tout d'abord de façon cohérente, c'est-à-dire que l'activité des neurones est, dans ces différentes aires, en partie synchronisée; la communication est par ailleurs complexe, au sens où si l'on cherche à compresser les informations qu'elle véhicule à l'aide d'un logiciel de compression numérique, on conserve malgré tout une information qui reste riche et diverse; enfin, il s'agit d'une information différenciée, dont les caractéristiques diffèrent

Dans le cerveau conscient, des aires distantes ont de riches échanges d'information

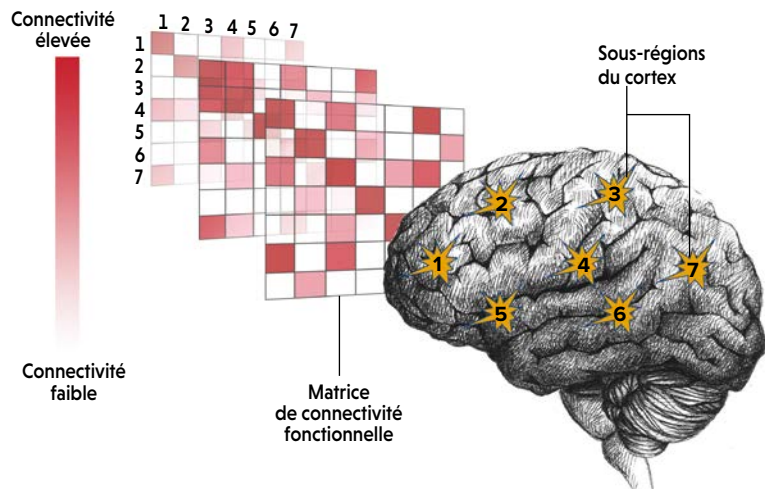
selon les aires corticales engagées dans cette conversation.

Dans certaines situations pathologiques, cette conversation devient excessive, appauvrie et indifférenciée; c'est typiquement ce qui survient lors d'une crise d'épilepsie accompagnée d'une perte de conscience. Autrement dit, pour être conscient, le cerveau doit se trouver dans un mode de communication suffisant, mais non excessif.

Récapitulons: pour être conscient, un cerveau doit être d'une part éveillé, et d'autre part le siège d'une activité spécifique, à la fois cohérente, complexe et différenciée selon les critères qui précèdent. Or il est aujourd'hui possible de détecter dans l'activité cérébrale la combinaison de ces deux conditions nécessaires et suffisantes à l'état conscient. À l'aide de l'IRM fonctionnelle ou de l'électroencéphalographie, nous parvenons à savoir si un cerveau est conscient, s'il est endormi et inconscient, ou encore s'il est éveillé mais inconscient.

UN ÉTAT DE FORTE CONNECTIVITÉ FONCTIONNELLE

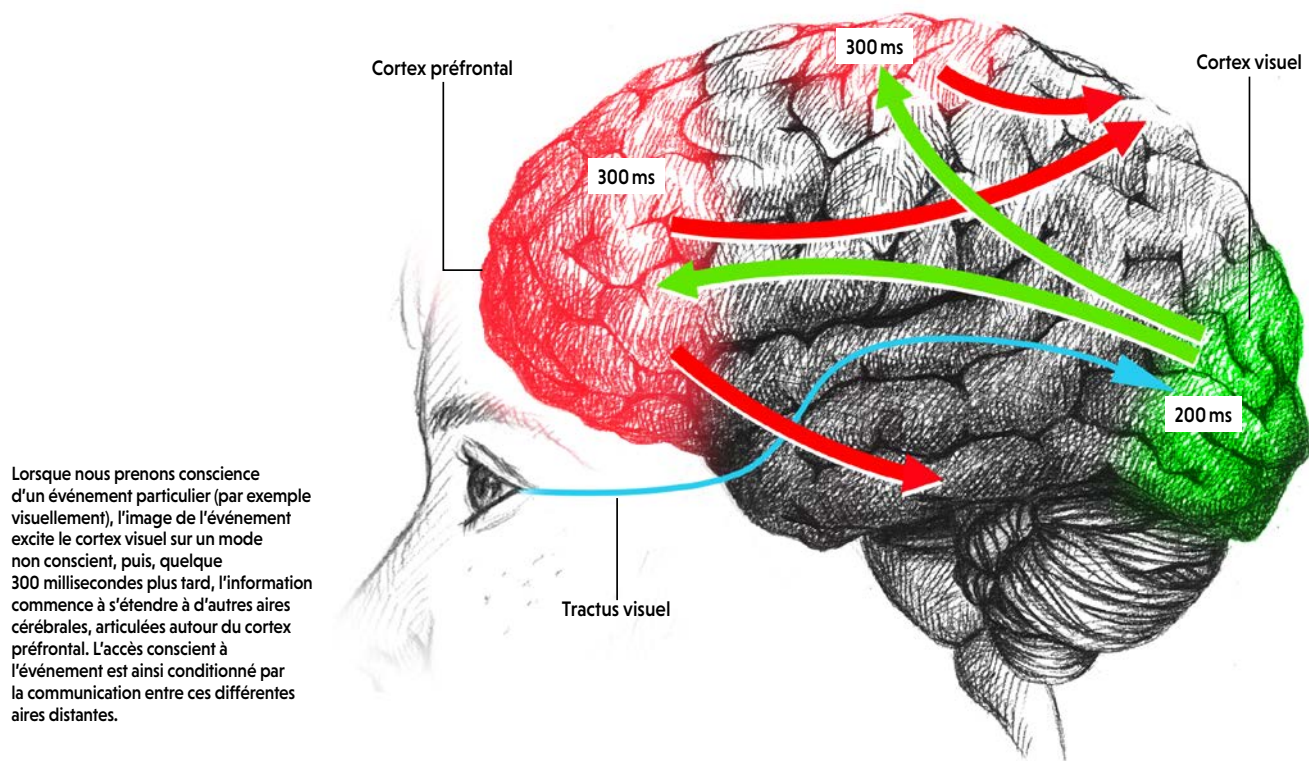
Les états conscients se repèrent par la richesse des communications à longue distance entre différentes sous-régions cérébrales (ici, on en a représenté sept, à seule fin d'illustration). À chaque instant, chaque sous-région du cortex est fonctionnellement connectée à certaines autres sous-régions (elles s'activent de manière analogue au même moment), ce que l'on représente dans un tableau appelé matrice : plus deux régions sont connectées, plus la case située à leur intersection dans le tableau tend vers le rouge. Un cerveau conscient se repère à des transitions rapides entre un très grand nombre de telles matrices, reflétant une connectivité fonctionnelle riche et changeante.



DES SIGNATURES CÉRÉBRALES IDENTIFIABLES

À titre d'exemple, une série de travaux réalisés dans les années 2000 conjointement dans mon laboratoire et celui de Stanislas Dehaene, au centre de neuro-imagerie de l'Inserm et du CEA, au sud de Paris, nous ont permis de caractériser ces signatures cérébrales de l'état conscient. Nous les utilisons auprès de malades plongés dans des états où il leur est impossible de communiquer (par exemple, des patients en syndrome *locked-in*, conscients mais paralysés, ou des sujets éveillés dont on ignore s'ils sont conscients ou non).

Pour identifier de telles signatures cérébrales de la conscience, l'une des pistes de recherche les plus prometteuses consiste à s'intéresser à la dynamique des configurations d'activité cérébrale. Voyons, encore une fois, le cortex sous la forme d'un ensemble de



sous-régions disposées à sa surface, telle une mosaïque. Notre hypothèse est que la signature de cet état conscient réside dans la nature précise des interactions qu'ont ces différentes sous-régions, ce qu'on appelle leur connectivité fonctionnelle.

Concrètement, si deux sous-régions ont tendance à s'activer simultanément, de façon concertée, on considère alors qu'elles sont fonctionnellement connectées. Décrire l'état conscient du cerveau à un instant donné revient alors à mesurer cette connexion fonctionnelle entre toutes les paires possibles de sous-régions cérébrales. Pour ce faire, on construit un tableau constitué d'autant de lignes et de colonnes qu'il y a de sous-régions prises en considération, et l'on reporte dans chaque case de ce tableau – ou matrice – un nombre d'autant plus élevé que la connexion entre les deux aires figurant dans la colonne et la ligne correspondante est intense (*voir l'encadré page ci-contre*).

DES TRANSITIONS D'UNE CONFIGURATION CÉRÉBRALE À UNE AUTRE

À chaque instant, l'état de connexion fonctionnelle du cerveau peut être représenté au moyen d'une telle matrice. Si l'on enregistre l'activité cérébrale à l'aide de l'IRM fonctionnelle pendant une vingtaine de minutes, il est possible d'estimer le nombre de matrices différentes qui semble décrire au mieux la dynamique cérébrale durant cette période.

Une série de travaux récents ont mis en évidence deux résultats originaux. Tout d'abord, le nombre de ces matrices semble plus élevé lorsque le sujet est conscient, par comparaison avec des états d'inconscience tels que le coma, l'état dit végétatif, l'anesthésie générale ou le sommeil profond. Deuxièmement, certaines de ces matrices semblent plus spécifiquement associées à l'état conscient. Lorsque nous sommes conscients, notre cerveau présente une combinaison complexe d'activations et d'inhibitions entre des régions corticales distantes, ce que l'on n'observe pas dans la plupart des états inconscients. Cette façon d'analyser le fonctionnement du cerveau permet véritablement d'isoler des signatures neuronales de l'état conscient, par opposition aux états non conscients.

Nos états conscients sont donc faits de transitions variées d'une configuration cérébrale à une autre (ou, plus précisément, d'une configuration de connexions fonctionnelles à une autre). Cela vaut indépendamment du contenu de notre conscience. Cet état de transition forme en quelque sorte la toile de fond de notre conscience. Sur cette toile de fond surgissent, à différents instants de notre vie, des prises de conscience particulières.

Imaginez-vous au volant de votre voiture traversant un paysage de collines verdoyantes. Votre attention, flottante, gère la conduite en mode semi-automatique, tandis que les notes d'un concerto de Tchaïkovski parviennent >

> distraitement à votre oreille. Soudain, un panneau lumineux annonce un accident à un kilomètre et fait signe de ralentir. Sur la toile de fond de votre conscience surgit brusquement un événement ponctuel qui suscite cette fois une prise de conscience. Comment décrire ce qui se passe alors dans votre tête ?

Afin de répondre à cette question générale, mes collègues et moi avons mené des expériences pour enregistrer l'activité cérébrale lorsque nous percevons un stimulus visuel ou auditif. Grâce à ces études, nous avons mis au jour un scénario en deux étapes.

Tout d'abord, toute perception commence par une étape non consciente (*voir la figure page précédente*). Au moment où le signal lumineux annonçant l'accident frappe votre rétine, les aires visuelles de votre cerveau commencent à s'activer avant même que vous en perceviez l'image consciemment, pendant environ 300 millièmes de seconde. Puis, au-delà de cette durée, la représentation inconsciente du signal commence à s'amplifier et à diffuser dans d'autres régions du cerveau.

L'ESPACE DE TRAVAIL GLOBAL, SUPPORT DE LA CONSCIENCE

Ces différentes aires qui diffusent l'information font partie de ce que l'on appelle l'espace de travail global conscient : selon la théorie proposée par le psychologue cognitiviste américain Bernard Baars, puis reprise et enrichie d'une version neuronale par Stanislas Dehaene, Jean-Pierre Changeux et moi-même, l'espace de travail global se compose d'un réseau d'aires organisées autour de la partie la plus antérieure de l'encéphale, le cortex préfrontal. Une fois prise en charge à ce niveau, la représentation devient consciente et l'on voit véritablement le signal. Puis l'activité neuronale peut alors atteindre des niveaux de représentation très complexes – notamment le sens des mots apparaissant sur le panneau d'alerte. En 2000, avec Stanislas Dehaene et Laurent Cohen, nous avons ainsi identifié une aire cérébrale qui reconnaît la forme visuelle des mots écrits, puis permet à l'espace global de travail d'en fournir un traitement conscient.

Grâce aux techniques telles que l'électroencéphalographie ou la magnéto-encéphalographie, il est possible de saisir la dynamique temporelle fine de la prise de conscience, à l'échelle de la milliseconde. Trois événements caractéristiques se produisent, qui permettent de repérer à coup sûr ce moment de prise de conscience.

L'un est une amplification soudaine et soutenue de la représentation initiale dans le réseau cérébral perceptif impliqué (par exemple les régions visuelles ou auditives).

Dans le même temps, intervient une modification très spécifique d'un paramètre appelé

puissance spectrale des neurones, qui décrit la contribution relative des principales ondes cérébrales (alpha, bêta, gamma, delta) au signal électrique d'ensemble du cerveau.

Enfin, on note une augmentation concomitante de la connectivité fonctionnelle entre la région perceptive impliquée et les régions qui composent l'espace de travail global (en particulier les cortex pariétaux et préfrontaux).

Ce scénario semble très général, et il faudra tester sa validité dans la prise de conscience de tous ces autres contenus plus difficiles à contrôler pour un expérimentateur : un souvenir, une émotion, une intention...

Ainsi, nous commençons à savoir décrire assez finement la dynamique complexe de l'activité cérébrale qui caractérise nos états conscients. Que le cerveau comporte des signatures physiologiques de la conscience, c'est un fait. Mais qu'il soit suffisant à produire l'intégralité de l'expérience consciente, voilà qui est beaucoup moins certain.

Mon équipe de recherche a récemment montré que lorsque nous prenons conscience d'un stimulus, non seulement notre cerveau présente les signatures décrites plus haut, mais nos pupilles se dilatent, notre cœur accélère. À l'École normale supérieure, l'équipe de Catherine Tallon-Baudry a récemment découvert que la façon dont notre cerveau sent et analyse les battements du cœur pourrait jouer un rôle dans notre conscience de soi. Alors, à quel point ces marqueurs somatiques (liés au corps) de notre vie mentale sont-ils nécessaires à notre vie consciente ?

ÉLUCIDER LES RELATIONS ENTRE LE CERVEAU, LE CORPS ET L'ENVIRONNEMENT

De la même manière, la conscience, et notamment la richesse de ses contenus, requiert très probablement des interactions sociales très précoces, ainsi qu'une histoire individuelle, mais également intersubjective et culturelle. À la suite de l'anthropologue français François Flahault, il est absurde de penser le cerveau et la conscience comme isolés du monde environnant, et comme clivés des interactions avec ce monde qui leur permettent de se constituer. François Flahault voit là une sorte de nouveau dualisme fondé non pas sur une distinction radicale entre l'esprit et le corps, mais sur une distinction tout aussi radicale entre la conscience et le monde dans lequel le sujet se construit.

L'élucidation des relations entre le cerveau, le corps et l'environnement, notamment l'environnement humain et culturel, constitue l'une des grandes questions des sciences de la conscience. À n'en pas douter, cela devrait faire l'objet de travaux originaux et transdisciplinaires au cours des années à venir. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Demertzi et al., **Human consciousness is supported by dynamic complex patterns of brain signal coordination**, *Science Advances*, vol. 5, article eaat7603, 2019.

S. Dehaene et al., **What is consciousness, and could machines have it ?**, *Science*, vol. 358, pp. 486-492, 2017 (voir aussi *Science*, vol. 359, pp. 400-402, 2018 pour des réactions et réponses).

S. Dehaene, **Le Code de la conscience**, Odile Jacob, 2014.

L. Naccache, **Le Nouvel inconscient. Freud, Christophe Colomb des neurosciences**, Odile Jacob, 2006.

cité

sciences
et industrie

À l'occasion de la sortie de son numéro 500, le magazine *Pour la Science* convie le physicien philosophe Étienne Klein et ses invités à venir partager avec le public quelques éléments de réflexion autour des défis contemporains de la mécanique quantique.

Avec Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences; Bruce Benamran, créateur de la chaîne Youtube «e-penser»; Gérard Berry, informaticien, professeur au Collège de France et membre de l'Académie des sciences; Nathalie Besson, physicienne des particules, CEA.

Séance animée par Cécile Lestienne, directrice des rédactions de *Pour la Science* et *Cerveau & Psycho*.

Dessins en direct par Lison Bernet.

balade dans le monde de la physique quantique

table ronde

— jeudi 6 juin à 18h30



R

ENDEZ-VOUS

P.82 Logique & calcul
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

DÉCOUPER UN TRIANGLE EN TRIANGLES

Est-il possible de découper un triangle en un nombre donné de morceaux triangulaires plus petits? Aujourd'hui encore, on découvre de nouveaux et remarquables résultats sur ce type de questions.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au Centre
 de recherche en
 informatique, signal
 et automatique de Lille
 (Cristal)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

Certains des résultats que nous allons présenter serviront aux enseignants pour animer leurs classes avec des problèmes amusants que l'on résout en réalisant de petits dessins; d'autres serviront à concevoir des exercices de programmation et montreront l'utilité des ordinateurs en mathématiques; d'autres encore illustreront que partout, même au sujet des plus élémentaires structures géométriques, se glissent de délicates questions qui exigent de longs raisonnements, et parfois restent non résolues.

L'ÉNIGME DU NOMBRE DE DÉCOUPAGES

Il existe 4 façons de découper un triangle en trois triangles plus petits (*triangles A1 à A4 dans l'encadré 1, page ci-contre*). Un seul de ces découpages (A1) ne contient pas de triangles se regroupant en un triangle interne: on dira que c'est un découpage premier (par analogie avec les nombres premiers). Quand nous affirmons qu'il n'y a qu'un seul découpage premier d'un triangle en 3 triangles, nous voulons dire que tout autre découpage premier d'un triangle en 3 triangles se ramènera à celui-là par une transformation continue du plan qui préserve les segments de droites utilisés dans les dessins.

En langage plus simple, deux découpages seront considérés équivalents si, en ayant dessiné le premier sur une feuille de caoutchouc parfaitement élastique, on sait déformer la feuille en s'arrangeant pour que les segments

de droites des dessins restent droits à chaque instant, sans la déchirer ni la replier, et qu'on réussit à faire coïncider le premier découpage avec le second. On dit alors qu'il n'y a qu'un seul découpage premier du triangle en 3 triangles «à une déformation topologique continue près». Dans la suite, nous ne mentionnerons plus, en général, cette précision.

Autre résultat, qui demande plus de soin: il existe 23 découpages d'un triangle en 4 triangles, et 3 d'entre eux sont premiers. Amusez-vous à reconnaître les découpages premiers dans les figures de l'encadré 1 ou, mieux, essayez de retrouver vous-même les 23 découpages (de B1 à B23).

Une autre question se pose: les 23 découpages sont-ils tous vraiment différents au sens topologique? Pour s'en assurer voici une méthode. Pour chaque découpage, on considère les points de rencontre des segments intérieurs au triangle et on note leurs caractéristiques.

Pour le découpage B1, par exemple, il n'y a qu'un seul point intérieur, et il correspond à la rencontre de 3 segments. On notera cela {3}.

Pour le découpage B2, on a 2 points intérieurs, le premier est la rencontre de 3 segments, tandis que le second est la rencontre d'une extrémité de segment avec un point intérieur à un segment. On notera {3, 1+1/2} cette caractéristique du découpage.

Le troisième découpage B3 aura ainsi pour caractéristique {4}. Viennent ensuite {1+1/2, 1+1/2, 1+1/2} pour le triangle B4, {} pour B5 (il n'y a aucun point intérieur).