

Il reste que, pour des dispositifs pas trop petits, on peut exciter ou détecter des magnons à l'aide de micro-ondes ou d'ondes lumineuses du domaine visible. C'est pourquoi des dispositifs magnoniques peuvent s'intégrer aisément à l'électronique photonique, par exemple dans les disques magnéto-optiques.

Les défis de la magnonique ne manquent pas. Le principal réside dans le passage de la technologie développée à l'échelle micrométrique, opérationnelle aujourd'hui, vers une technologie fonctionnant à l'échelle nanométrique. Cette miniaturisation se heurte aux limites des outils actuels de nanolithographie. Il existe toutefois d'autres techniques prometteuses, par exemple la cristallisation de colloïdes, qu'il faudra combiner avec les techniques classiques d'élaboration des dispositifs magnétiques, telles la lithographie électronique (gravure avec un faisceau d'électrons) ou l'épitaxie par jets moléculaires (dépôt de couches sous vide à l'aide de faisceaux de molécules).

Un autre défi majeur concerne la compréhension des phénomènes en jeu. La pro-

pagation des ondes de spin est complexe, en particulier quand des irrégularités sont présentes ou quand ces ondes interagissent avec d'autres types d'excitations présentes dans le matériau (phonons, plasmons, électrons, etc.).

Des électromagnons plus dociles

Ces recherches fondamentales réservent peut-être encore des surprises, à la hauteur de celle causée par la découverte d'une nouvelle excitation hybride dans les multiferroïques en 2006. Nommée électromagnon, et prédite dès les années 1970 par les Ukrainiens Viktor Bar'yakhtar et Irina Chupis, il aura fallu attendre plus de 20 ans pour qu'Andrei Pimenov et ses collègues de l'Université d'Augsburg, en Allemagne, la détectent dans deux matériaux multiferroïques (TbMnO_3 et GdMnO_3). En 2008, notre équipe a également découvert des électromagnons dans le multiferroïque BiFeO_3 .

L'électromagnon est une excitation hybride, mi-onde de spin, mi-vibration

polaire : c'est un magnon doté d'un dipôle électrique. Il provient d'un couplage intense entre le magnétisme et la ferroélectricité, mais le mécanisme microscopique qui en est à l'origine demeure mal connu. Il reste par exemple à déterminer pourquoi certains multiferroïques donnent naissance à des électromagnons, et pas d'autres.

Quoi qu'il en soit, les électromagnons offrent la possibilité de contrôler plus efficacement les ondes de spin *via* un champ électrique : dans les multiferroïques « classiques », l'application d'un champ électrique modifie la position des ions, qui influe à son tour sur les ondes de spin, tandis que dans les matériaux multiferroïques où sont présents des électromagnons, le champ électrique agit directement... sur les électromagnons.

La magnonique en est à ses balbutiements. Les défis théoriques et techniques sont nombreux et, comme le montre le cas des électromagnons, fortement intriqués. Ils ouvrent en tout cas la perspective d'une électronique nanométrique performante. ■



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur www.jardindesplantes.net, dans "l'agenda du jardin"

CONFÉRENCES

Cycle : « La Chimie dans tous ses états »

Lundi 7 novembre - 18 h : Chimie et microorganismes
D. Buisson, chargée de recherche, CNRS / Muséum

Lundi 14 novembre - 18 h : Regards de la chimie sur les plantes à usages traditionnels - A. Mambu, maître de conférences, Muséum

Lundi 28 novembre - 18 h : Écologie chimique, molécules de communication - S. Prado, maître de conférences, Muséum

Lundi 5 décembre - 18 h : Molécules de défense et de communication des bactéries - S. Rebuffat, professeur, Muséum

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e
Métro : Gare d'Austerlitz - Jussieu

COURS PUBLICS

Par Matthieu Gounelle, spécialiste des météorites, dép. Histoire de la Terre, Laboratoire de Minéralogie et de Cosmochimie, Muséum

Cycle : « La cosmochimie »

Jeudi 1^{er} décembre - 18 h : Histoires de chutes

Jeudi 8 décembre - 18 h : Physico-chimie du milieu interstellaire et des disques protoplanétaires

Jeudi 15 décembre - 18 h : Des météorites aux planètes

Grand Amphithéâtre du Muséum
57 rue Cuvier, Paris 5^e - Métro : Jussieu



Des ondes dans le cerveau

Stéphane Charpier

Les neurones sont le siège de mouvements de particules chargées, qui créent des microcourants responsables des ondes électriques enregistrées à la surface du crâne. La fréquence de ces ondes reflète l'état de vigilance et de conscience.

Si l'on pose une électrode métallique à la surface du crâne d'un sujet, et qu'on la connecte à un amplificateur couplé à un oscilloscope, on observe des fluctuations spontanées du potentiel électrique dont l'amplitude peut varier de quelques microvolts à plusieurs millivolts. On enregistre ainsi des variations de potentiel dans les diverses aires du cerveau : ce sont les ondes cérébrales. Ce phénomène bioélectrique intrigant résulte de mécanismes neuronaux complexes, partiellement élucidés (nous y reviendrons), et constitue la seule information issue du cerveau pensant que l'on peut analyser en temps réel, avec une précision de l'ordre de la milliseconde.

Les ondes électriques cérébrales sont présentes dans l'ensemble du règne animal. Elles peuvent être enregistrées chez toutes les espèces, des centres nerveux des mollusques constitués de quelques neurones globulaires compactés, jusqu'au cerveau humain contenant environ 10^{12} neurones. La gamme des fréquences utilisées dans le règne animal – du dixième à plusieurs centaines de hertz – a été conservée au cours de l'évolution, malgré le développement des structures cérébra-

les et des aptitudes comportementales, et l'émergence de nouveaux processus mentaux. Quelques différences ont été néanmoins identifiées, mais on en ignore l'origine et la signification. Il semblerait que les ondes cérébrales des poissons et des reptiles, entre autres, aient une amplitude inférieure à celle des mammifères.

Des ondes cérébrales omniprésentes

Par ailleurs, le cerveau des invertébrés, notamment celui des insectes, crustacés, gastéropodes, vers de terre et autres annélides, produirait plus d'ondes électriques de fréquences supérieures à 100 hertz que celui des vertébrés. Enfin, notons que la pieuvre *Octopus vulgaris*, dont l'activité électrique cérébrale est similaire à celle des vertébrés, est le seul animal chez qui les ondes cérébrales présentent des interruptions transitoires inexplicables : pendant plusieurs minutes, l'activité cérébrale cesse..., mais on ignore pourquoi.

La plupart des manuels de neurologie indiquent que les ondes électriques cérébrales ont été décrites chez l'homme dans les années 1920 par le psychiatre alle-

mand Hans Berger (1873-1941), lequel publiera ses découvertes en 1929 et inventera le terme électroencéphalogramme, ou EEG, encore utilisé aujourd'hui pour qualifier les décharges électriques enregistrées à la surface et dans la profondeur du cerveau. Toutefois, l'existence d'une activité électrique cérébrale spontanée avait été découverte un demi-siècle plus tôt par un jeune enseignant de l'École de médecine de Liverpool, Richard Caton (1842-1926). Le 24 août 1875, il publiait dans les comptes rendus de l'Association médicale britannique ses observations préliminaires, obtenues chez le lapin et le singe, indiquant que de faibles courants spontanés peuvent être systématiquement enregistrés entre deux électrodes placées à la surface du cortex cérébral et que ces ondes électriques semblent être en relation avec la fonction de la région corticale concernée.

Dès la fin du XIX^e siècle, il fit avec d'autres neurophysiologistes de nombreuses découvertes, qui ont toutes été confirmées ultérieurement, sur les propriétés des potentiels électriques cérébraux. Il montra que ces potentiels sont souvent de nature oscillatoire, qu'ils sont modulés par des stimulations sensoriel-



les et qu'ils apparaissent quand les régions corticales où on les enregistre sont activées. Mais il fallut encore une cinquantaine d'années pour comprendre les mécanismes de leur formation.

Le premier à avoir proposé un modèle neuronal pour expliquer l'origine des ondes cérébrales fut l'Anglais Edgar Douglas Adrian (1889-1977). Il reçut le prix Nobel de médecine et de physiologie en 1932 pour avoir découvert que l'information sensorielle, par exemple la tension musculaire, est directement liée à l'activité électrique des fibres nerveuses qui connectent les muscles. Après avoir étudié l'activité des fibres nerveuses, il explora les propriétés des rythmes électroencéphalographiques dans le cortex de l'homme, mais les mécanismes qu'il proposa pour les expliquer étaient faux.

Après avoir examiné le modèle permettant d'expliquer la présence d'un courant électrique, de différences de potentiel et d'ondes dans le cerveau, nous verrons quelles informations on peut extraire d'un EEG, et comment ces enregistrements sont une façon d'aborder l'étude de la conscience. Commençons par la première question: comment les neurobiologistes

expliquent-ils aujourd'hui la présence de courants électriques dans le cerveau? Ils assimilent les neurones pyramidaux, qui représentent l'essentiel (80 pour cent environ) des neurones du cortex, à des dipôles électriques produisant des courants extracellulaires à l'origine des ondes cérébrales.

L'hypothèse du dipôle

Les corps cellulaires des neurones pyramidaux, qui ont une forme triangulaire, sont répartis dans diverses couches du cortex (on en distingue six). Les neurones pyramidaux ont la particularité de présenter une grande dendrite dite apicale d'où partent de nombreux prolongements. Les dendrites apicales parcourent de longues distances et se projettent jusqu'à la surface du cortex. Elles sont connectées aux axones issus d'autres neurones par des synapses; les axones assurent une transmission rapide des signaux nerveux.

Comment applique-t-on le modèle du dipôle aux neurones pyramidaux? Un dipôle électrique « idéal » est un élément conducteur portant sur des sites adjacents des charges électriques, égales en

L'ESSENTIEL

✓ Les courants électriques dus à des déplacements d'ions à travers la membrane des neurones donnent naissance à des différences de potentiel électrique, signal détecté dans les électroencéphalogrammes.

✓ Le traitement par transformation de Fourier permet de faire apparaître dans un EEG toutes les fréquences qui le composent.

✓ L'enregistrement, lors d'une crise d'épilepsie de type absence, d'un EEG, reflet de l'activité cérébrale globale, et de l'activité de neurones isolés, permet de préciser les mécanismes du passage de la conscience à l'état inconscient.

© Shutterstock/Andrea Danti

L'AUTEUR



Stéphane CHARPIER, professeur de neurosciences à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), est directeur de recherche à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, ICM, à Paris.

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 10 novembre 2011, Stéphane Charpier évoquera les recherches menées sur les ondes cérébrales dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h.

www.franceculture.fr

nombre et de signes opposés. Ainsi, les neurones pyramidaux du cortex cérébral peuvent être considérés comme des dipôles électriques canalisant les microcourants électriques induits par l'activation des synapses. Voyons comment naissent ces courants élémentaires.

Les neurones pyramidaux établissent des connexions – des synapses – entre eux et avec des neurones des structures sous-corticales, notamment du thalamus qui traite les informations sensorielles et leur sert de relais ; le thalamus participe à la régulation de la veille, du sommeil et de la conscience. Les neurones du thalamus établissent des contacts synaptiques avec les neurones pyramidaux et libèrent du glutamate, le principal neurotransmetteur excitateur, dans les synapses, ce qui stimule le neurone pyramidal postsynaptique (voir l'encadré page ci-contre).

La fixation du glutamate sur ses récepteurs synaptiques déclenche l'ouverture de canaux situés dans la membrane des neurones pyramidaux permettant à un flux d'ions positifs de pénétrer dans la dendrite. Ce flux de charges positives entrant dans la dendrite entraîne une redistribution des charges positives selon l'axe de la dendrite, laquelle canalise le courant vers des régions intracellulaires moins

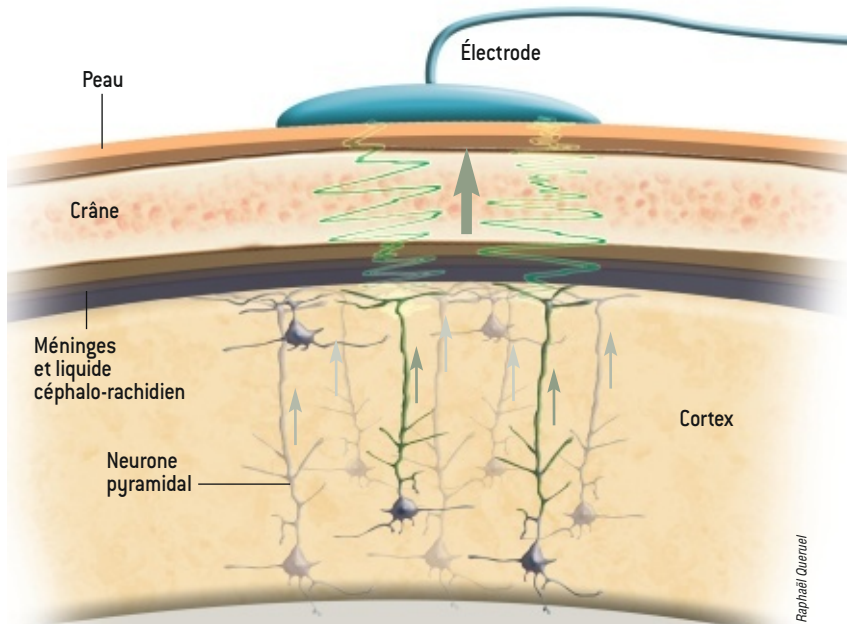
« positives ». La ligne de courant traverse les canaux membranaires où diffusent les ions, se propage dans le milieu extracellulaire et revient à l'endroit de la synapse qui a perdu des charges positives.

Nous avons évoqué ici le cas des synapses excitatrices. Le même raisonnement peut être appliqué aux synapses inhibitrices, où le neurotransmetteur n'est plus le glutamate, mais l'acide gamma-aminobutyrique (GABA), le principal neurotransmetteur inhibiteur. Ces synapses inhibitrices, situées sur les neurones pyramidaux, sont issues d'un autre type de neurones, les interneurons (ou neurones intermédiaires). Ces derniers peuvent être activés par les neurones thalamiques et les neurones pyramidaux eux-mêmes. Les interneurons provoquent dans le neurone pyramidal un courant local sortant, par entrée d'anions (ions chlore) ou sortie de cations (ions potassium). Si l'on considère les lignes de courant entre l'intérieur et l'extérieur du neurone, une ligne de courant due à une synapse inhibitrice est l'inverse de celle correspondant à une synapse excitatrice.

Une somme de courants élémentaires

Par conséquent, le neurone se comporte comme un dipôle présentant des « sources » et des « puits » de courants synaptiques : les fuites de charges électriques de l'intérieur vers l'extérieur du neurone constituent les sources, tandis que les régions synaptiques d'origine, appauvries en charges électriques, se comportent comme des puits vers lesquels convergent les lignes de courant. Le modèle du dipôle est très efficace, mais se heurte à deux difficultés : d'une part, l'amplitude des ondes cérébrales enregistrées à la surface du crâne ou du cerveau dépend, selon la loi d'Ohm, du produit de l'intensité des courants synaptiques et de la résistance électrique du tissu cérébral, deux paramètres de faible valeur rendant les potentiels électriques cérébraux « unitaires » (issus de chaque synapse) extrêmement faibles. D'autre part, le potentiel électrique décroît en fonction du carré de la distance à sa source.

Dans ces conditions, comment peut-on enregistrer aussi aisément des ondes électriques sur un cerveau ? C'est rendu



1. LES ONDES ÉLECTRIQUES DE SURFACE, qui sont détectées par les électrodes placées à la surface du crâne, représentent la somme des courants synaptiques extracellulaires engendrés par les neurones pyramidaux. Ces derniers se comportent comme des dipôles électriques et leurs dendrites apicales quasi parallèles favorisent cette somme des courants individuels. Le courant global résultant est assez intense pour être détecté, malgré les différentes structures qui recouvrent le cortex.

possible par l'arrangement géométrique des dendrites apicales, parallèles entre elles et perpendiculaires à la surface incurvée du cerveau (voir la figure 1). Un tel arrangement permet aux courants synaptiques de chaque neurone naissant dans le tissu cérébral de s'additionner dans l'espace et dans le temps. Ainsi, la sommation spatio-temporelle de chaque courant élémentaire produit un courant macroscopique détectable par des électrodes placées sur le crâne.

Parce que des courants parallèles s'ajoutent, la survenue synchrone de courants synaptiques dans un grand nombre de neurones se traduit par des ondes électroencéphalographiques dont l'amplitude est d'autant plus grande que le nombre de synapses impliquées est grand ; sa polarité (négative et positive) dépend du sens des courants synaptiques (excitateurs ou inhibiteurs). On sait par ailleurs que la durée d'ondes cérébrales dites très corrélées est d'autant plus brève et leur amplitude d'autant plus grande que le nombre de synapses impliquées est important et que ces synapses sont activées quasi simultanément. Au contraire, de multiples activités synaptiques dites faiblement corrélées dans le temps sont reflétées sur un EEG de surface par des ondes rapides et de faible amplitude.

Ainsi, on comprend l'origine des courants électriques détectés sur le scalp. Encore faut-il pouvoir enregistrer ces courants, et savoir interpréter les tracés obtenus. Jusqu'au début du XX^e siècle, les méthodes utilisées pour décrire les ondes électriques cérébrales ne permettaient pas de détecter les fluctuations les plus rapides, ce qui rendait impossibles des mesures précises de la fréquence des ondes. Le physiologiste polonais Napoléon Nicodemus Cybulski (1854-1919) fut le premier à comprendre l'importance d'une représentation graphique des ondes électriques cérébrales, et réalisa en 1914 les premiers clichés photographiques des potentiels électroencéphalographiques du chien et du singe. Il découvrit ainsi des ondes rapides (de l'ordre de 25 hertz) sur le cortex, connues aujourd'hui pour être associées à l'état cérébral conscient.

Durant la seconde moitié du XX^e siècle, de nouvelles méthodes d'enregistrement électroencéphalographique et la numérisation des signaux obtenus marquèrent le début du traitement informatique des ondes électriques cérébrales. On a ainsi pu préciser la structure temporelle et

L'ORIGINE DU COURANT ÉLECTRIQUE CÉRÉBRAL

Dans le cortex, les neurones sont essentiellement des neurones pyramidaux. Les corps cellulaires de ces neurones, en forme de pyramide, sont localisés dans les couches corticales II, III, V et VI. Ces neurones utilisent comme médiateur chimique le glutamate, le principal neurotransmetteur excitateur (en orange).

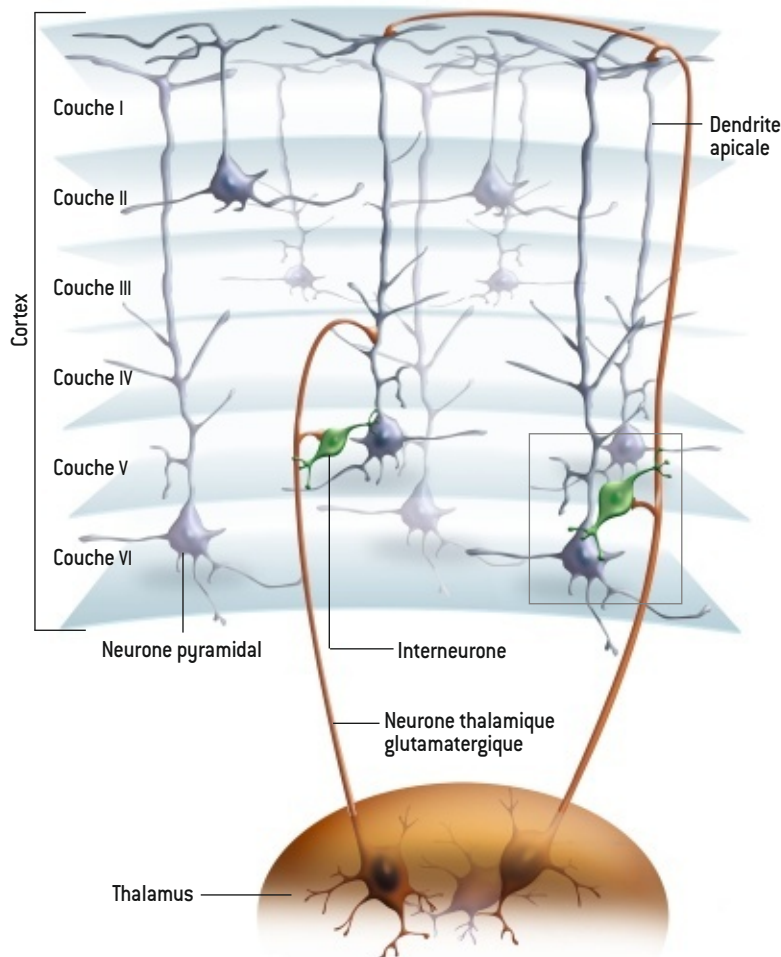
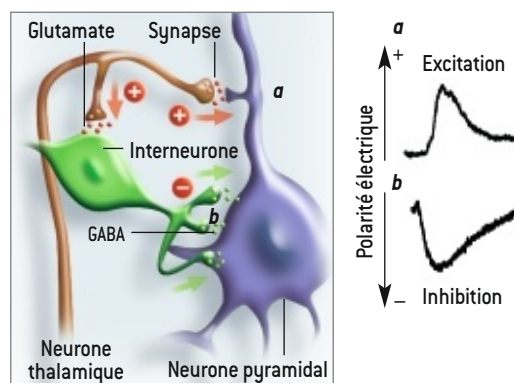
Les neurones des couches superficielles (II et III) se projettent vers des neurones corticaux du même hémisphère ou de l'hémisphère opposé. Au contraire, les neurones des couches profondes (V et VI) sont plutôt connectés avec des structures sous-corticales, notamment le thalamus.

Les neurones thalamiques se projettent en retour dans

les couches I et IV du cortex où ils établissent des contacts synaptiques avec les neurones pyramidaux et avec les interneurones. Ces interneurones sont connectés aux neurones thalamiques par des synapses glutamatergiques excitatrices, et aux neurones pyramidaux par des synapses GABAergiques inhibitrices. Le GABA (en vert)

est le principal neurotransmetteur inhibiteur.

Ainsi, une microélectrode peut enregistrer dans le neurone pyramidal un signal excitateur (a), ou un signal inhibiteur, de polarités électriques inverses (b). Ces potentiels synaptiques, excitateurs ou inhibiteurs, sont à l'origine des ondes électriques cérébrales.



Raphaël Quenel

spatiale de ces ondes en relation avec les états de vigilance et les tâches cognitives. La méthode la plus fréquemment utilisée pour ce type d'analyse est la transformation de Fourier. On y décompose un signal fluctuant en une somme de fonctions sinusoïdales de différentes fréquences, ce qui permet de déterminer, sur un enregistrement de l'activité électrique cérébrale, l'énergie relative des différentes fréquences des ondes qui le composent. Cette méthode permet d'extraire l'ensemble des fréquences des ondes cérébrales et de les associer à différents états de l'activité du cerveau. C'est ainsi que furent établies les bases d'une classification des fréquences des rythmes corticaux en relation avec les états de vigilance.

Un état éveillé, au repos, est généralement lié à des oscillations correspondant à dix hertz environ (c'est le rythme alpha) prédominant dans les régions occipitales. Ce sont des ondes de relativement faible amplitude et reflétant des activités synaptiques synchrones. Durant la transition vers le sommeil lent (sans rêve), de nouvelles oscillations cérébrales, plus lentes et amples, apparaissent. Dans les phases précoces du sommeil, durant lesquelles se

réalise la déconnexion fonctionnelle entre le cerveau et le monde extérieur, des fuseaux d'ondes à 7-15 hertz surviennent sur le cortex. La plongée vers un sommeil plus profond peut être identifiée par la prédominance d'ondes à fréquences plus basses, les ondes delta (de 1 à 4 hertz) et les ondes dites lentes (de 0,5 à 1 hertz). L'utilisation de filtrages spécifiques du signal EEG permet d'éliminer sélectivement différentes gammes de fréquences, afin de mieux révéler les autres.

L'éveil, comme le sommeil avec rêve, se traduit par des modifications drastiques de la forme et de l'amplitude des ondes EEG. Deux grands types d'oscillations de faible amplitude peuvent être alors distingués sur la base de leurs fréquences. Les ondes bêta (de 15 à 30 hertz) prédominent dans les régions motrices du cortex et correspondent à la préparation de comportements moteurs. Les ondes gamma, les plus rapides (de 30 à 200 hertz), sont considérées comme le rythme de l'hypervigilance. Elles permettent peut-être à un stimulus sensoriel d'accéder à la conscience en coordonnant les réponses neuronales réparties dans tout le cortex. Toutefois, cette fonction causale du rythme

gamma dans l'expérience mentale subjective, globale et cohérente, reste débattue.

Les transformées de Fourier représentent un outil utile pour le décodage des fréquences des ondes cérébrales. Elles fournissent une information globale sur l'ensemble de la durée de l'enregistrement, mais n'en donnent aucune sur le moment exact de survenue des différentes fréquences composant le signal EEG. Cela pose une difficulté, car le simple examen visuel d'un tracé électrique cérébral révèle que les oscillations sont dynamiques : leur composition en fréquences évolue au cours du temps, même lorsque l'état de vigilance ne change pas.

La dynamique des ondes cérébrales

Peut-on résoudre cette difficulté et obtenir une analyse dynamique des ondes du cerveau ? Oui, grâce à l'analyse temps-fréquences. Il s'agit de transformer le signal enregistré en une représentation associant à chaque instant le poids relatif des différentes fréquences qui y sont présentes, mais noyées dans un signal global. De telles cartes reliant les fréquences au temps

LE MODÈLE DU DIPÔLE

Une synapse excitatrice, qui fonctionne avec le neurotransmetteur glutamate, entraîne une fuite d'ions et peut être considérée comme un puits de courant. Au contraire, à distance, des ions s'accumulent, de sorte que les membranes cellulaires se comportent comme des sources de courant.

Au niveau du puits (a), l'enregistrement du potentiel intracellulaire révèle une déflexion positive du potentiel (ou dépolarisation) alors qu'un enregistrement extracellulaire (b) indique localement une déflexion négative du potentiel (due à l'entrée de charges positives dans la cellule). L'enregistrement extracellulaire distant (au niveau de la source) (c) montre une variation positive du potentiel (due à la sortie de charges positives).

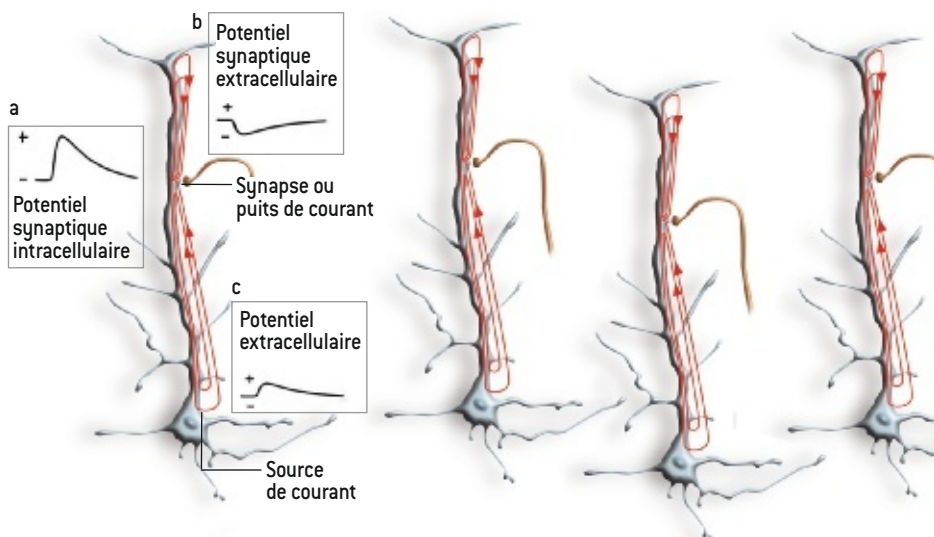
En effet, des cations entrent dans le neurone au niveau de la synapse, puis en sortent à distance. Dès lors, une synapse est appa-

uvie en charges électriques et représente un puits, vers lequel convergent les lignes de champ issues d'une source de courant, où se concentre, au contraire, un excès de charges. La faible résistance électrique du milieu extra-

cellulaire par rapport à celle de la membrane cellulaire explique pourquoi les variations de potentiel extracellulaire sont plus faibles que celles mesurées dans la cellule.

Ainsi, chaque neurone est le siège d'un champ électrique. Les

ondes électriques de surface représentent la somme de tous les courants synaptiques extracellulaires produits par les cellules pyramidales, lesquelles se comportent toutes comme des dipôles électriques.



(on les nomme cartes temps-fréquences) sont obtenues en faisant « glisser » sur le tracé EEG des ondelettes de durée variable (et donc de différentes fréquences) : on superpose ces « fragments » d'ondes théoriques dont on connaît les paramètres (fréquence et amplitude) au signal enregistré, et on calcule en chaque point le degré de superposition. On décompose le signal enregistré en un mélange pondéré d'ondelettes bien caractérisées. Par analogie avec les ondes sonores, ces cartes temps-fréquences permettent une représentation quantitative et qualitative de la « musique cérébrale » associée aux différents états mentaux, normaux ou pathologiques.

On peut déduire encore d'autres informations dynamiques d'un EEG. Ainsi, il est possible de détecter si des oscillations de même fréquence dans des régions éloignées du cerveau sont synchronisées et, si c'est le cas, quelle est la région qui a imposé sa fréquence à l'autre. On évalue ainsi la synchronisation de phase d'ondes spatialement distribuées, ce qui (et nous y reviendrons) est important dans les phénomènes liés à la conscience. De telles études des propriétés dynamiques des ondes cérébrales, réalisées en recherche fondamentale et clinique, ont permis par exemple d'élucider les dysfonctionnements survenant dans des réseaux de neurones de grande dimension au cours de l'épilepsie, la maladie de Parkinson ou la schizophrénie.

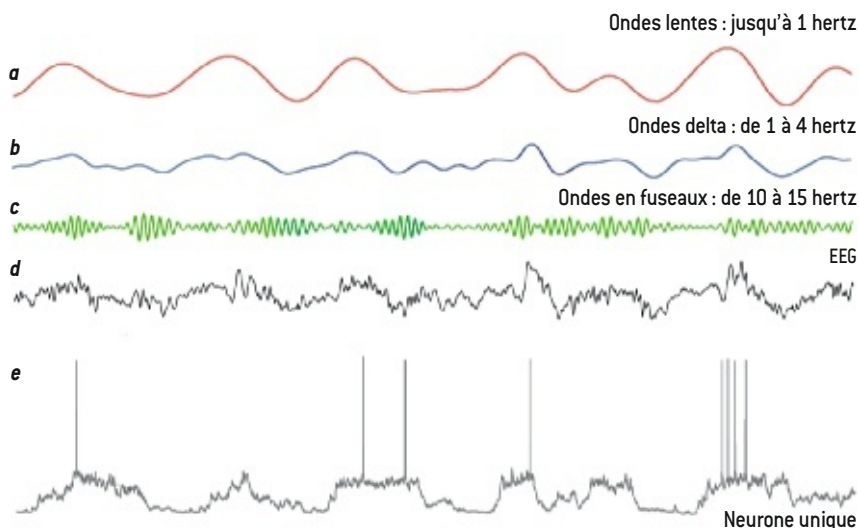
Ainsi, en utilisant les méthodes de mesure de synchronisation et de causalité, notre équipe a étudié les oscillations enregistrées lors de crises d'épilepsie de type absence, c'est-à-dire se manifestant par une perte de conscience sans contraction musculaire rythmique et durant quelques secondes. Les ondes enregistrées lors de telles crises sont apparemment synchrones dans l'ensemble du cerveau ; elles se déclenchent dans une petite région du cortex cérébral, puis se propagent dans de nombreux circuits synaptiques corticaux et sous-corticaux, responsables des symptômes cliniques observés durant la crise et qui contrôlent aussi l'arrêt de la crise. Cet exemple illustre la puissance des outils d'analyse des propriétés dynamiques des ondes cérébrales pour identifier les réseaux neuronaux responsables des syndromes neurologiques et leur impact sur le fonctionnement global du cerveau.

Comment aller plus loin dans la compréhension des mécanismes des ondes

cérébrales ? Comment identifier les processus neuronaux élémentaires qui sous-tendent les phénomènes mentaux associés ? Répondre à ces questions requiert de réaliser des expériences permettant d'enregistrer simultanément, et dans un état cérébral donné, les ondes cérébrales et les variations de potentiels électriques dans les neurones individuels : il faut pouvoir relier l'activité de neurones pris isolément dans différentes aires cérébrales à l'activité électrique cérébrale globale, celle que donne l'EEG. Les variations des potentiels électriques des neurones reflètent à la fois les informations synaptiques traitées par ces neurones, mais aussi les propriétés des canaux ioniques que renferme leur membrane.

Le passage du conscient à l'inconscient

Ce type d'étude, développée par le neurophysiologiste canadien né à Bucarest, Mircea Steriade (1924-2006), pour décrire les mécanismes neuronaux des différents états de vigilance et de l'épilepsie, est peu utilisé dans les laboratoires à cause de son extrême difficulté technique. Néanmoins, avec mes collègues, nous avons appliqué ce type d'approche expérimentale, combiné à la réalisation de cartes temps-fréquences, à l'étude des changements dynamiques



2. UN ENREGISTREMENT EEG (d) peut être décomposé après différents filtrages en plusieurs composantes de fréquence. Ainsi, le tracé brut (d) contient des ondes lentes (a), des ondes delta (b) et des fuseaux (c). L'amplitude de l'EEG reflète le nombre de neurones produisant simultanément des potentiels synaptiques. On constate que le tracé EEG (d), qui est la somme de potentiels issus de milliers de neurones individuels, suit les fluctuations du potentiel enregistré par une électrode implantée dans un neurone particulier situé à proximité de l'endroit où a été réalisé l'électroencéphalogramme (e).

BIBLIOGRAPHIE

D. Tucker et M. Holmes, **Les crises de la conscience**, *Pour la Science*, n° 405, pp. 40-46, 2011.

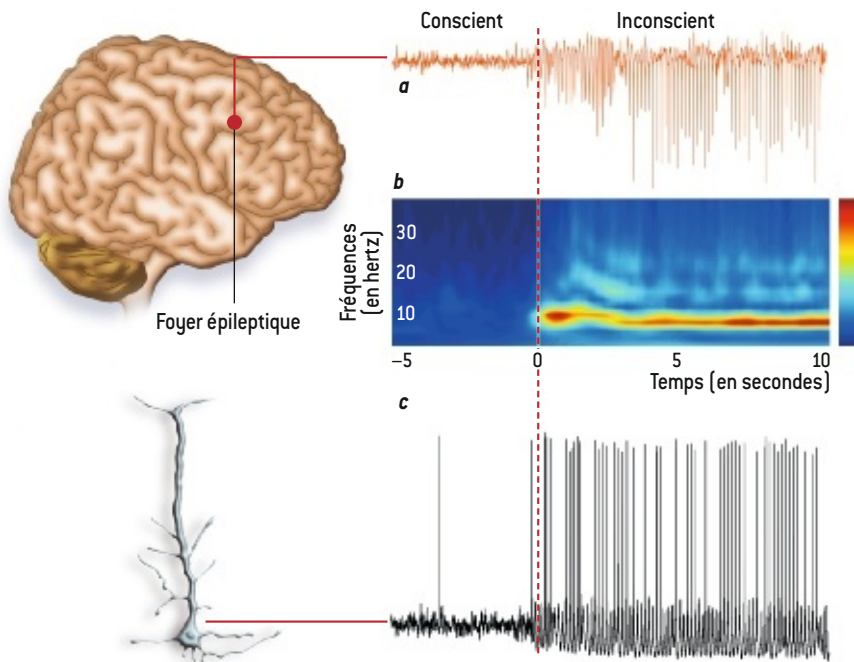
G. Dumaset *et al.*, **Inter-brain synchronization during social interaction**, *PLoS One*, vol. 17, 5(8):e12166, 2010.

P. Polack *et al.*, **Deep layer somatosensory cortical neurons initiate spike-and-wave discharges in a genetic model of absence seizures**, *J. Neurosci.*, vol. 27, pp. 6 590-6 599, 2007.

M. Le Van Quyen et A. Bragin, **Analysis of dynamic brain oscillations : methodological advances**, *Trends Neurosci.*, vol. 30(?), pp. 365-373, juillet 2007.

Electroencephalography : Basic principles, clinical applications and related fields, E. Niedermeyer, et F. Lopes da Silva (sous la direction de), Lippincott, Williams and Wilkins, 2004.

T. Bullock et E. Basar, **Comparison of ongoing compound field potentials in the brains of invertebrates and vertebrates**, *Brain Res*, vol. 472(1), pp. 57-75, 1988.



3. LA TRANSITION ENTRE CONSCIENCE ET INCONSCIENCE est suivie chez un rat atteint d'un type d'épilepsie nommé absence, une perte de conscience qui dure quelques secondes. On enregistre les ondes électriques corticales (a) et l'activité des neurones pris un à un dans la zone du foyer épileptique (c). Le traitement mathématique de l'enregistrement du signal global (EEG) fournit une carte dynamique où l'on peut montrer comment les fréquences évoluent au cours du temps, ce que ne permet pas un examen visuel de l'EEG. On obtient ainsi une carte temps-fréquences qui indique les amplitudes relatives (b, des moins intenses en bleu aux plus intenses en rouge) des fréquences du signal EEG au cours de cette transition d'états de vigilance. Ainsi, dans ce cas, les fréquences proches de dix hertz prédominent au cours de la perte de conscience.

survenant, chez le rat, dans les ondes EEG lors d'une crise d'épilepsie de type absence. Nous enregistrons l'EEG du rat et les variations de potentiel dans des neurones où sont implantées des électrodes. Ainsi, nous avons accès à l'activité des neurones et à l'activité cérébrale globale.

Ces expériences nous ont permis de mieux comprendre les mécanismes de genèse des crises, mais ont aussi révélé les mécanismes neurobiologiques qui sous-tendent une transition quasi instantanée entre un état conscient et un état inconscient. Les ondes EEG rapides et de faible amplitude, typiques de l'état conscient, sont associées à des potentiels synaptiques excitateurs, rapides et de faible amplitude, dans les neurones corticaux enregistrés à proximité du foyer épileptique.

Rappelons qu'une crise d'épilepsie naît dans une région très limitée du cortex et qu'elle se propage comme une onde à partir de ce point. La crise se traduit par l'apparition brutale d'ondes électriques corticales de grande amplitude et de basse fréquence, et synchronisées dans de nombreux neurones corticaux. L'analyse des

différents enregistrements révèle la présence d'oscillations ayant une fréquence légèrement plus élevée juste avant le déclenchement de la crise. Ces ondes cérébrales et neuronales seraient un indice précoce de la perte de conscience à venir.

Les ondes cérébrales : un régulateur des interactions sociales ?

L'étude des ondes cérébrales et neuronales permet de mieux comprendre comment les ondes corticales naissent dans une région limitée du cortex et se propagent à grande distance. Mais elle permet de suivre aussi comment se passe le basculement de la conscience à l'inconscience. Si, depuis une vingtaine d'années, les neuroscientifiques ont fait des progrès remarquables dans la compréhension du fonctionnement du cerveau, il reste quelques pierres d'achoppement. Découvrir les bases neuronales de la conscience et mettre au jour celles de la pensée sont les deux principaux défis auxquels ils sont confrontés.

Les variations des ondes électriques cérébrales représentent les seules activités neuronales instantanément corrélées aux différents processus mentaux (états de vigilance, tâches cognitives). Elles pourraient donc constituer un substrat électrobiologique pour un processus d'« émergence » de la conscience à partir de l'activité neuronale. Dans le cadre de cette théorie, défendue par le neurophysiologiste Benjamin Libet (1916-2007) et le chercheur en sciences cognitives Francisco Varela (1946-2001), les interactions complexes des unités fonctionnelles (les neurones) du cerveau produiraient une dynamique globale (les ondes cérébrales) d'où émergerait l'activité mentale consciente. Autrement dit, l'activité globale du cerveau aurait une dimension supérieure à la simple somme des activités des neurones pris individuellement, ou encore le tout aurait des propriétés supérieures à la somme des propriétés de ses constituants. On aurait ici un phénomène d'émergence (ou causalité ascendante), la dynamique des neurones se combinant en une dynamique cérébrale globale plus riche.

Inversement, l'activité mentale elle-même agirait, par un mécanisme de rétroaction « descendante », sur les activités cérébrales : l'activité globale agirait localement sur telle ou telle aire responsable de telle ou telle capacité cognitive. Ces phénomènes de causalité réciproque, supérieurs aux simples corrélats neurobiologiques de la conscience – les réseaux de neurones –, semblent indiquer que les activités électriques du cerveau et les expériences conscientes s'influencent par une sorte d'empreinte réciproque, mais ils n'éclairent pas (encore ?) les mécanismes neurobiologiques d'émergence de la conscience.

Une récente étude réalisée par le groupe de Line Garnero (1955-2009), à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, a montré qu'au moment précis où un individu imite le mouvement de la main de quelqu'un d'autre, les ondes corticales de l'individu imitateur et celles de l'individu imité se synchronisent dans une gamme donnée de fréquences. Ainsi, les ondes cérébrales ont de multiples fonctions : elles déterminent l'état mental de l'individu (veille, éveil, conscience, etc.), elles contrôlent les fonctions cognitives, et on découvre qu'elles sous-tendraient les interactions sociales. Et elles détiennent sans doute le secret de l'émergence de la conscience et du contenu de la pensée... ■

La maladie d'Alzheimer peut détruire quarante ans d'amour...



...vous avez le pouvoir de la vaincre en soutenant la recherche française.

Chaque année des milliers de familles sont victimes de la maladie d'Alzheimer.



La Ligue Européenne Contre la Maladie d'Alzheimer (LECMA) est une association française pour la recherche médicale, régie par la loi de 1901, à but non lucratif. LECMA finance des programmes de recherche visant la découverte d'un diagnostic et d'un traitement efficace de la maladie d'Alzheimer. Elle informe le grand public en organisant des actions d'information et d'éducation sur la prévention, le diagnostic et le traitement de la maladie.

Pour apporter des informations et des conseils pratiques à tous ceux qui sont ou se sentent concernés par la maladie d'Alzheimer, LECMA édite régulièrement des brochures d'information. Voici les brochures à votre disposition :

- Comprendre la maladie d'Alzheimer.
Ce n'est pas seulement une question d'oubli
- Comment mieux aider les personnes qui entourent les patients : gestion du stress
- La déambulation et le patient atteint d'Alzheimer
- Prévenir la maladie d'Alzheimer : est-ce possible ?
- Conduire en toute sécurité au 3^{ème} âge

Ces brochures sont consultables et téléchargeables sur notre site **www.maladiealzheimer.fr**. Si vous souhaitez les recevoir, contactez-nous par téléphone, par courrier ou par courriel.

➤ **Soutenez la recherche et envoyez votre don* par chèque à LECMA - 94 rue La Fayette 75010 Paris.**

* Votre don vous donne droit à une déduction fiscale de 66 % dans la limite de 20 % de votre revenu imposable.



Ligue
Européenne
Contre la
Maladie d'Alzheimer

POUR TOUTE INFORMATION

- ☎ appelez-nous au 01 42 46 50 86
- ✉ écrivez-nous à LECMA - 94 rue La Fayette - 75010 Paris
- 🖱 consultez notre site **www.maladiealzheimer.fr**
- @ envoyez-nous un courriel à **info@maladiealzheimer.fr**