

(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.

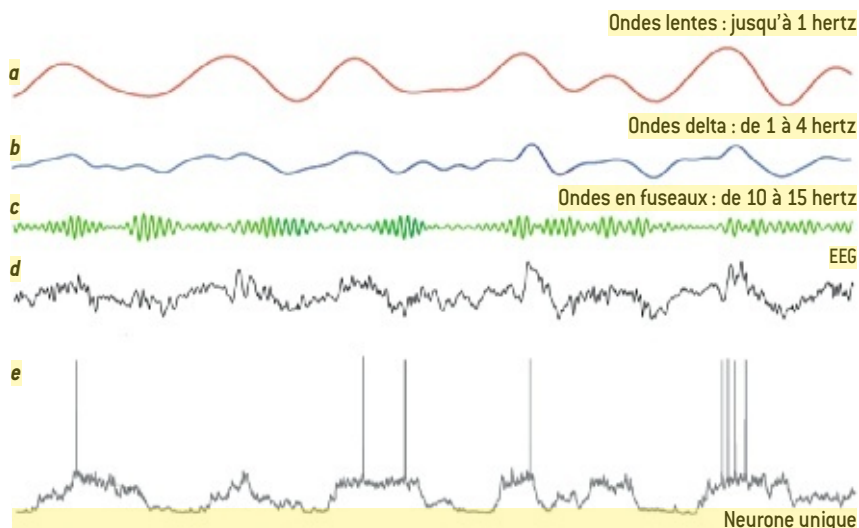
Ainsi, en utilisant les méthodes de mesure de synchronisation et de causalité, notre équipe a étudié les oscillations enregistrées lors de crises d'épilepsie de type absence, c'est-à-dire se manifestant par une perte de conscience sans contraction musculaire rythmique et durant quelques secondes. Les 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.

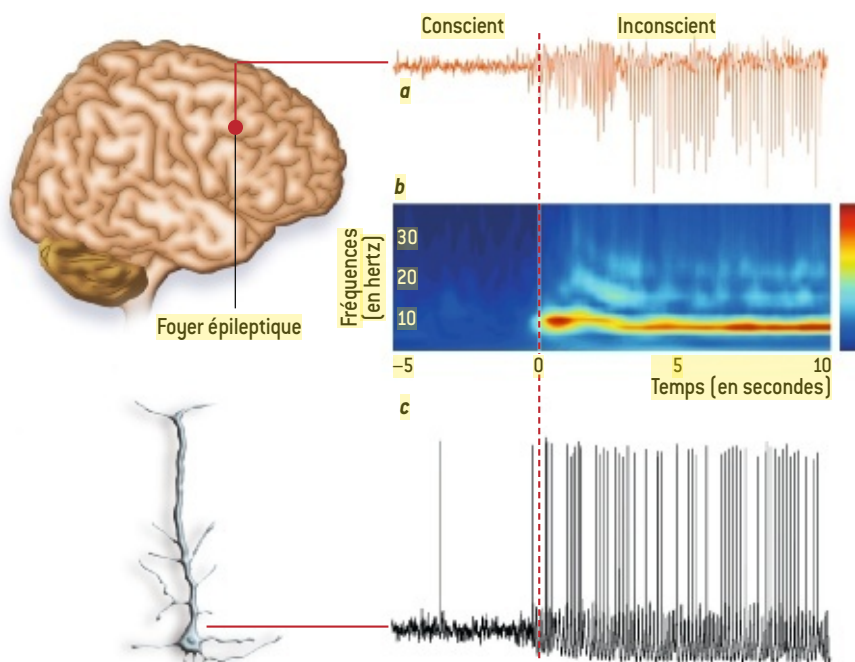
G. Dumaset *et al.*, **Inter-brain synchronization during social interaction**, *PLoS One*, vol. 17, 5(8):e12166, 2010.

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...