

ou EEG peuvent être enregistrés plus de 1 000 fois par seconde, ces techniques sont assez rapides pour «filmer» l'évolution temporelle de l'activité cérébrale.

## Les détecteurs

Le premier tracé EEG a été réalisé, en 1929, par le neurophysiologiste allemand Hans Berger qui a enregistré le signal électrique du cerveau d'un patient trépané. Depuis, le principe de mesure est resté le même, bien que les moyens techniques aient évolué. Il consiste à mesurer des différences de potentiel entre des électrodes disposées à la surface du crâne, le contact électrique étant assuré par un gel conducteur. Le nombre d'électrodes utilisées peut varier, de 20 électrodes dans le montage standard, à 128, voire 256 (montages utilisés essentiellement en neurosciences cognitives). Dans ce dernier cas, les électrodes sont disposées dans un bonnet posé sur la tête du patient alors que, pour des enregistrements de plusieurs jours comme c'est le cas en épilepsie, les électrodes sont collées directement sur le scalp. Étant donné qu'on ne peut pas mesurer de potentiel absolu, le choix d'une électrode de référence est indispensable, mais constitue l'une des limitations de l'EEG, puisque l'activité mesurée sur cette référence n'est, en réalité, pas fixe, mais évolue en fonction du temps. Les signaux électriques du cerveau furent, dès le début, utilisés pour étudier l'évolution temporelle de l'activité cérébrale, mais on ne commença à en faire des images qu'avec l'avènement de la magnétoencéphalographie.

Les champs magnétiques (de l'ordre de  $10^{-13}$  tesla) produits par les très faibles courants électriques du cerveau sont un milliard de fois inférieurs au champ magnétique terrestre. Dès lors, il faut recourir à des techniques de détection extrêmement sensibles dont la mise au point est récente. Les premiers enregistrements des champs magnétiques cérébraux ont été obtenus en 1972 par David Cohen, physicien spécialiste des techniques de blindage à l'Institut de technologie du Massachusetts. Ils étaient devenus possibles avec la mise au point de capteurs de champ magnétique fondés sur des supraconducteurs à basse température. Ces anneaux supraconducteurs nommés SQUIDS (pour *Superconducting Quantum Interference Device*, dispositif d'interférence quantique supraconducteur) avaient été mis au point par James Zimmerman, du Bureau américain des normes, deux ans auparavant seulement et transforment le flux de champ magnétique en tension électrique. Dans un MEG, les capteurs, confinés à l'intérieur d'un cryostat, sont plongés dans de l'hélium liquide contenu dans un réservoir placé au-dessus du casque pour assurer leur refroidissement. La consommation d'hélium liquide d'un tel instrument est d'environ 100 litres par semaine.

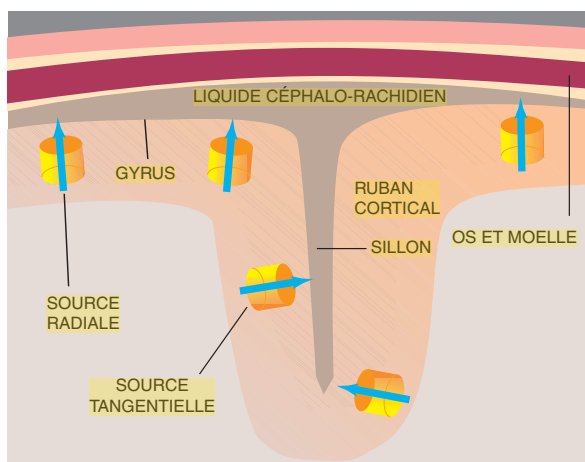
Toujours à cause de la faible intensité des champs cérébraux, le système de mesure doit être isolé des champs magnétiques externes et, pour ce faire, on réalise un «blindage». On sait que les champs magnétiques parasites, tels le champ magnétique terrestre ou les champs produits par les appareils électriques ou électroniques utilisés, varient lentement dans l'espace, tandis que les champs produits par l'activité neuronale décroissent rapidement avec la distance. Pour s'affranchir des champs parasites, chaque capteur contient parfois plusieurs bobines

réceptrices de flux dont les signaux sont soustraits de manière à éliminer la composante du champ magnétique qui varie peu dans l'espace, pour ne conserver que la composante qui s'atténue très vite, produite dans le cerveau. Par ailleurs, la protection la plus efficace consiste à placer le système de mesure dans une chambre blindée formée de parois en métal qui atténuent les champs extérieurs d'un facteur  $10^3$  à  $10^4$ .

À cause de la chambre blindée et de l'utilisation des supraconducteurs à basse température, la MEG est une technologie d'imagerie coûteuse, du même ordre de grandeur que l'IRM fonctionnelle. Néanmoins, ces instruments ont notablement progressé ces dernières années. Alors que les premiers systèmes ne comportaient qu'une trentaine de capteurs au maximum, et ne couvraient qu'une partie du cerveau, deux sociétés commercialisent aujourd'hui des systèmes comportant un casque de plus d'une centaine de capteurs, qui couvre la tête entière. De plus, grâce à ces nouveaux systèmes, on réalise des enregistrements simultanés MEG et EEG, et nous en examinerons l'intérêt.

## La mise en images de la pensée

Lorsque l'on observe un cerveau en activité, comment distinguer les sites activés par une tâche que l'on étudie des sites qui le sont par d'autres tâches, voire qui correspondent à l'activité minimale de repos? En neurosciences cognitives, on recourt souvent à la technique dite du moyennage des tracés EEG ou MEG. En additionnant les tracés obtenus lors de la répétition d'un même stimulus dans la même tâche, on espère faire ressortir les composantes spécifiques, qualifiées de réponses évoquées, de l'activité cérébrale étudiée. Une réponse évoquée comporte souvent des composantes précoces qui interviennent environ entre 20 et 150 millisecondes après le stimulus et qui sont associées à la perception sensorielle du stimulus, mais aussi à des comportements cognitifs, tout comme le sont les composantes évoquées qui surviennent plus tardivement. Grâce à cette technique, on étudie de



**3. L'ORIENTATION DES DIPÔLES** qui modélisent l'activité des macrocolonnes détectées en MEG et en EEG dépend de leur position. En général, ces dipôles sont perpendiculaires à la surface du ruban cortical. Ainsi, les sources situées dans les sillons du cortex apparaissent souvent comme des dipôles tangentiels et les sources proches du scalp, situées sur les gyres, apparaissent comme des sources, qualifiées de radiales, perpendiculaires à la surface de la tête.

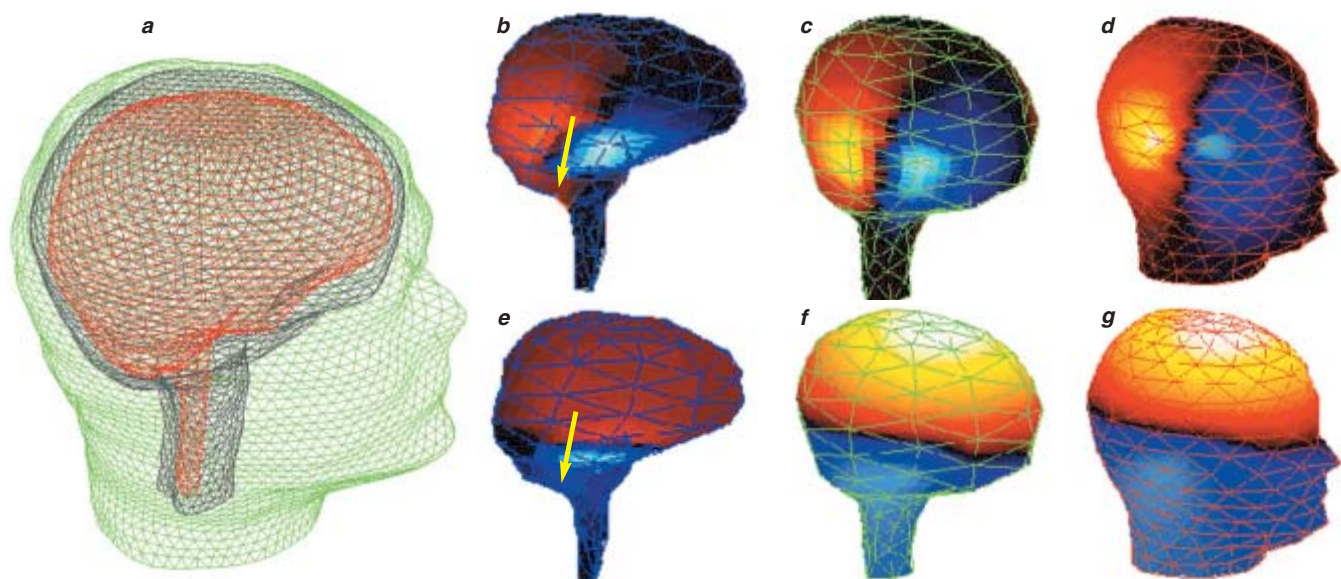
nombreux processus sensitifs ou cognitifs. Pour appliquer la méthode de moyennage des tracés, on doit admettre que les réactions cérébrales sont reproductibles d'un essai à l'autre et également d'un sujet à l'autre. Pour s'affranchir de cette hypothèse, on développe aujourd'hui de nouvelles procédures statistiques qui ne nécessitent plus de moyennage, et grâce auxquelles on analyse les données propres à chaque sujet et à chaque essai. Ainsi, de nombreux neurobiologistes admettent aujourd'hui que, durant une tâche cognitive, des assemblées de neurones sont activées et que leurs décharges sont synchronisées (voir *Synchronisation neuronales et représentations mentales*, par Wolf Singer, page 74). Par conséquent, en relevant, sur les enregistrements MEG ou EEG, les aires du cerveau dont les signaux se synchronisent au cours d'une tâche, les neurobiologistes espèrent identifier les régions qui sont associées à cette tâche, sans recourir au moyennage.

### La localisation des sources

Lorsque l'on parvient à remonter jusqu'à la position, à l'orientation et à l'intensité des courants sources dont les effets se manifestent sur le scalp, on réalise une véritable image de l'activité cérébrale. Pour ce faire, la première difficulté réside dans le faible nombre de mesures dont on dispose : de l'ordre de 300, contre 10 000 à un million pour la tomographie par émission de positons ou l'IRM fonctionnelle. Ensuite, les signaux recueillis à distance des sites actifs doivent être traités mathématiquement afin de reconstituer la répartition des sources dipolaires qui leur ont donné naissance. Ceci revient à résoudre un problème qualifié de direct, puis un second problème qualifié d'inverse.

La résolution du problème direct consiste à modéliser la façon dont l'activité électrique du cerveau se mani-

fest globalement à la surface de la tête : étant donné des courants sources et des courants volumiques répartis dans le cerveau, pouvons-nous calculer les champs et les potentiels qu'ils engendrent sur le scalp? Ceci est nécessaire, car avant de pouvoir affirmer que telle configuration électrique et magnétique sur le scalp correspond à telle répartition de courants dans le cerveau, il faut savoir avec précision comment les champs produits par l'activité neuronale sont déformés par la traversée des différents milieux conducteurs de la tête. Ainsi, les courants volumiques dépendent de la géométrie et de la conductivité de tous les tissus de l'encéphale, propriétés qu'il nous faut connaître et modéliser, pour chaque sujet. Ces tissus ont une géométrie complexe et leur conductivité est mal connue. Cependant, bien que les valeurs des propriétés électriques des tissus mesurées *in vitro* ou *in vivo* sur des animaux anesthésiés diffèrent, on dispose d'un certain nombre de résultats qui sont suffisants pour résoudre approximativement le problème direct. Ainsi, l'os du crâne a une conductivité environ 80 fois inférieure à celle de l'ensemble des autres tissus, et cette conductivité est anisotrope, c'est-à-dire que sa valeur dépend de la direction du courant (le crâne a une conductivité, dans les directions tangentielles à sa surface, environ trois fois plus élevée que dans la direction perpendiculaire). On montre que cette anisotropie déforme les lignes de potentiel tangentielle-ment à la surface de la tête et, par conséquent, que ces lignes doivent apparaître sur le scalp beaucoup plus étalées qu'elles ne le sont à l'intérieur de la tête. En revanche, le champ magnétique est peu perturbé par les différences de conductivité et il est peu déformé par la présence de l'os entre les sources et les capteurs (ceci contribue aussi à la meilleure résolution spatiale de la MEG). Ayant une idée approximative de ces paramètres physiques, il nous faut déterminer la forme des «conducteurs», les



**4. LE PROBLÈME DIRECT** consiste à calculer les valeurs du champ magnétique et du potentiel électrique engendrés par une source, ici, un dipôle (flèche jaune) situé dans le cortex auditif. Pour cela, on dispose d'un modèle des interfaces cerveau-crâne et crâne-scalp, faisant apparaître les propriétés conductrices de ces milieux (a). On peut alors établir le champ magnétique à la surface du cerveau (b), de l'os (c),

et de la peau (d), ainsi que le potentiel électrique produit par le même dipôle sur chacune de ces surfaces (e, f, et g). On constate que le champ magnétique est peu déformé par les différents milieux (la tête est, pour ainsi dire, «transparente»), alors que, du fait de la mauvaise conductivité de l'os, le potentiel mesuré sur le scalp présente un aspect sensiblement différent de celui qu'il a au niveau du cortex.