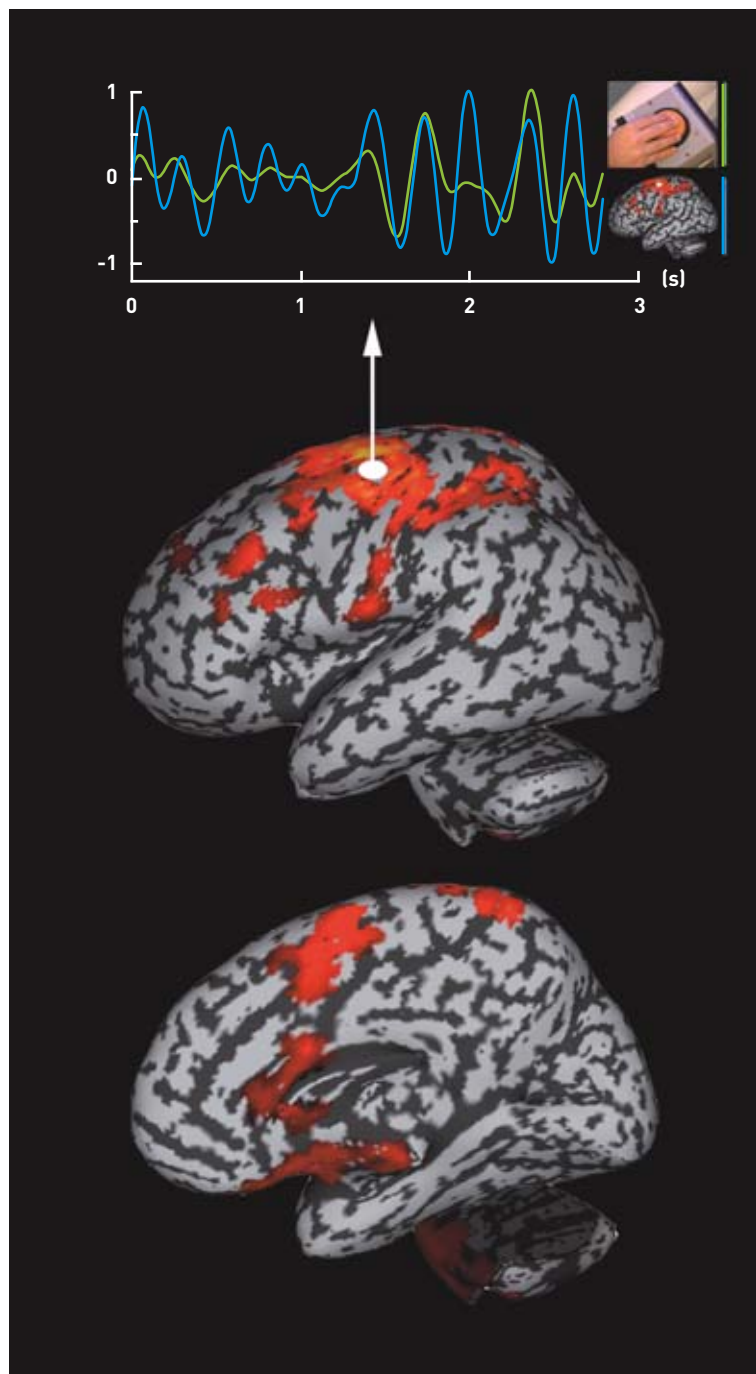


# Les progrès de la magnétoencéphalographie

Afin d'accéder à la résolution temporelle des fonctions cognitives, les chercheurs utilisent la magnétoencéphalographie (MEG) en complément de l'IRM. Cette méthode d'imagerie fait, notamment au niveau des capteurs, des progrès qui lui ouvrent des applications élargies.



Mise en évidence par imagerie MEG d'une corrélation importante entre l'activité cérébrale et la vitesse de la main au cours d'une tâche (manipulation d'une souris d'ordinateur). Le cerveau est représenté selon une vue de côté (au milieu) et de l'une de ses parties médianes (en bas). L'imagerie MEG révèle un réseau de régions dont l'activité en basses fréquences est synchronisée à la vitesse de la main. Les tracés montrent la vitesse de la main (en vert), enregistrée pendant une durée de 3 secondes, et l'activité cérébrale correspondante (en bleu) dans la région principale impliquée dans la motricité de la main.

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) ne donne pas accès à la résolution temporelle des fonctions cognitives qui s'enchaînent à l'échelle de quelques dizaines de millisecondes. C'est pourquoi il faut recourir à une seconde méthode d'imagerie, la magnétoencéphalographie (MEG), qui donne accès au décours spatio-temporel de l'activité cérébrale chez l'adulte et l'enfant (Mémo C, *Les principales techniques d'imagerie médicale*, p. 36). Au niveau international, presque tous les centres similaires à la plateforme de neuro-imagerie NeuroSpin située sur le centre CEA de Saclay (Essonne) se sont équipés d'un système MEG.

C'est dans cette optique que le laboratoire de neuro-imagerie cognitive de NeuroSpin, le Service de physique de l'état condensé du CEA et la société finlandaise Elekta Neuromag se sont associés afin d'intégrer à la plate-forme NeuroSpin un équipement MEG de nouvelle génération. À terme, les expériences cognitives pourront être réalisées le même jour chez les mêmes volontaires en électroencéphalographie (EEG), en MEG et en IRM. Le projet comprend un volet technologique important, avec le développement de logiciels pour l'intégration des signaux EEG, MEG et IRM et de nouveaux capteurs de champs magnétiques ultrasensibles basés sur l'électronique de spin. Plusieurs équipes de sciences cognitives et de neurologie utiliseront ces outils pour l'étude des fonctions cognitives supérieures et de leurs pathologies chez l'adulte et l'enfant.

## Plus que complémentaire de l'EEG et de l'IRMf

Le laboratoire de neuro-imagerie cognitive (unité mixte Inserm-CEA) utilise depuis de nombreuses années l'EEG numérique à haute densité (128 ou 256 capteurs), en combinaison avec l'IRM fonctionnelle (IRMf) afin d'étudier les mécanismes cérébraux de la cognition humaine. L'EEG présente cependant des limites et commence à être surpassée, pour certaines applications, par la MEG. Par rapport à l'EEG, les avantages de la MEG sont nombreux. Son échantillonnage spatial est meilleur (plus de 300 capteurs), tandis que la sélectivité spatiale des capteurs, tout spécialement les gradiomètres planaires, et la moindre distorsion spatiale des signaux permettent une reconstruction plus focale et plus réaliste de leur origine dans le cortex. La résolution temporelle est accrue (digitalisation > 5 kHz) et donne un meilleur accès aux signaux de synchronie de haute fréquence. Enfin, l'EEG et la MEG n'étant pas également sensibles aux mêmes sources céré-

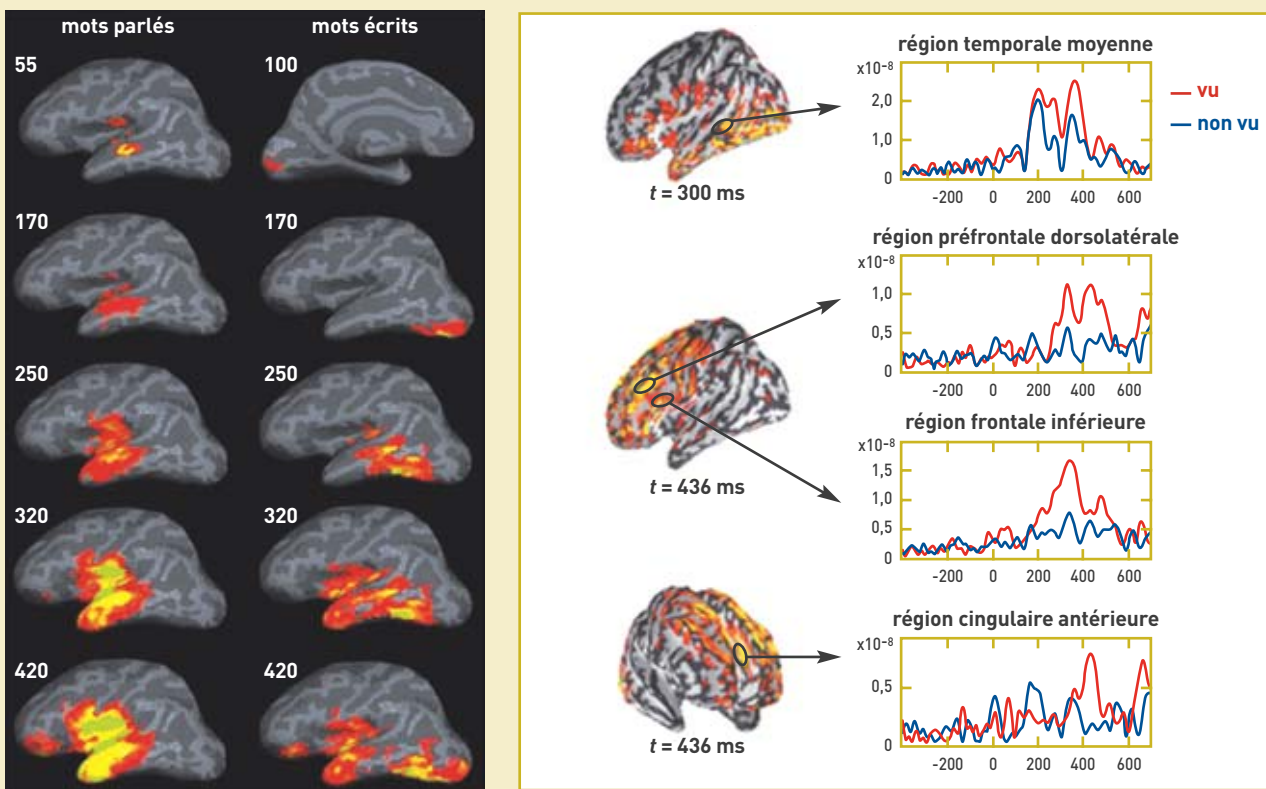


Figure 1. Séquence d'activité corticale distribuée durant le traitement des mots, reconstruite à partir de données MEG (à gauche, d'après Marinkovic *et al.* 2003) et de données EEG (à droite, d'après Sergent *et al.* 2005). La localisation spatiale des sources est clairement moins précise en EEG qu'en MEG (comparer par exemple l'image des mots écrits vers 300 ms).

brales présentent une complémentarité naturelle pour l'étude de l'activité du cortex cérébral humain dans son ensemble.

À partir des signaux EEG comme des signaux MEG, des algorithmes sophistiqués de traitement du signal permettent de proposer des reconstructions relativement réalistes de l'évolution temporelle de l'activité corticale telle qu'elle aurait pu être enregistrée en tout point de la surface du cortex avec une précision temporelle de quelques millisecondes. C'est ainsi que, dans les dernières années, des images détaillées de la dynamique de l'activité cérébrale humaine ont été obtenues, par exemple pendant la compréhension des mots entendus ou lus (figure 1). Il faut souligner que ces images ne sont qu'une reconstruction théorique sur ordinateur, non une observation directe de l'activité corticale, en sorte qu'elles continuent à être discutées et constamment améliorées. Néanmoins, il est juste de dire que, dans les trois dernières années, ces images obtenues à partir des enregistrements MEG ont atteint un degré de précision et de plausibilité inégalé, qui les rend comparables aux images d'IRM ou de tomographie par émission de positons.

Les études de la pathologie cérébrale ont également largement bénéficié de la très grande sensibilité de la MEG pour détecter de fines anomalies spatiales ou temporelles de l'activité cérébrale. Par exemple, l'imagerie de la lecture des mots isolés a démontré, chez les enfants dyslexiques, d'importantes anomalies vers 170 ms dans l'activation de la région occipito-temporale ventrale gauche impliquée dans la reconnaissance invariante de la forme visuelle des mots. De nombreuses

applications cliniques sont en cours de développement, particulièrement dans le domaine de l'épileptologie où la MEG fournit des informations essentielles sur la localisation et la propagation des crises.

Utilisée seule, la MEG possède également certaines limites. S'agissant d'une cartographie de champ, sa précision spatiale est imparfaite<sup>(1)</sup>, car il existe une ambiguïté dans la résolution du "problème inverse" qui consiste à reconstruire les sources intracrâniennes activées à partir des enregistrements EEG ou MEG. La MEG est également limitée dans sa capacité à détecter certains types de signaux qui proviennent de sources profondes ou orientés perpendiculairement à la surface du scalp. C'est le cas, par exemple, des signaux de la région cingulaire antérieure dont le rôle dans le contrôle exécutif et les anomalies dans la schizophrénie en font un sujet de recherche de grand intérêt. Fort heureusement, il existe dans ce domaine une complémentarité naturelle entre la MEG, l'EEG et l'IRMf, sur trois points.

### L'EEG, un pont entre la MEG et l'IRMf

La MEG est particulièrement sensible aux sources situées sur les flancs des sillons corticaux, tandis que l'EEG montre les réponses les plus focales aux sources radiales se trouvant à la surface des sillons, et qui sont précisément celles moins visibles en MEG. Certains travaux suggèrent également – bien que cela soit plus

(1) C'est pourquoi de petites bobines dont la position est connue sont souvent placées sur le crâne du sujet, ce qui génère un signal sur la carte des champs magnétiques.



MEG International Services Ltd.

Dispositif de magnétoencéphalographie. La plate-forme de neuro-imagerie NeuroSpin va s'équiper d'un système MEG de nouvelle génération.

discuté – une sensibilité différente de ces deux méthodes aux signaux de synchronie de haute fréquence, avec une activité dans la bande gamma<sup>(2)</sup> facilement détectable en EEG et une activité dans la bande bêta<sup>(3)</sup> peut-être plus visible en MEG<sup>(4)</sup>. Enfin, l'IRMf détecte des signaux hémodynamiques lents (signaux **BOLD**), mais dont l'amplitude est hautement corrélée aux signaux de haute fréquence mesurables en EEG et en MEG. Les signaux IRMf ont une très haute précision spatiale (de l'ordre de 1 ou 2 mm), mais sont considérablement lissés dans le domaine temporel par **convolution** avec la fonction de réponse hémodynamique. Bien qu'il ne soit pas impossible, par diverses astuces expérimentales, d'atteindre une précision temporelle de l'ordre de quelques centaines de millisecondes en IRMf, l'EEG et la MEG sont plus précises d'au moins un ordre de grandeur sur le plan temporel.

L'équipe NeuroSpin entend tirer parti des avantages respectifs des trois techniques à l'aide d'enregistrements partiellement simultanés. Elle prévoit de réaliser les mêmes expériences cognitives, chez les mêmes volontaires et patients, en utilisant, d'une part, l'EEG et l'IRMf simultanées, d'autre part, la MEG et l'EEG simultanées. Ainsi, l'EEG à haute résolution servira de pont entre la MEG et l'IRMf. Des méthodes ont été développées pour corréler de façon croisée les signaux EEG et IRMf enregistrés simultanément et obtenir ainsi une **résolution spatiale** du niveau de précision de l'IRM sur les sources EEG. De même, l'enregistrement simultané EEG et MEG améliore la résolution spatio-temporelle des reconstructions de sources distribuées. La mise en liaison, au sein du même logiciel, des trois sources de signaux (EEG, MEG et IRMf) doit donc conduire à des **modèles** d'activité cérébrale d'un haut degré de précision.

À plus long terme, les chercheurs espèrent pouvoir réaliser sur le même appareil de la MEG et de l'IRM bas champ en simultanée afin de disposer d'une très bonne résolution spatiale en MEG, aisément complétée par l'IRMf. Une initiative importante au niveau européen est lancée à cet effet début 2008.

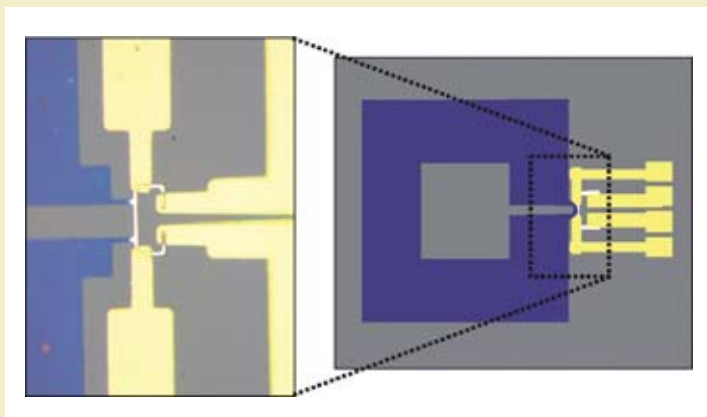
### De nouveaux capteurs pour la MEG

Les champs magnétiques rayonnés par les courants **neuronaux** sont extrêmement faibles, environ 10 femtotestas (1 fT = 10<sup>-15</sup> tesla). En comparaison, le **champ magnétique terrestre** est 10 milliards de fois plus grand ! Les seuls capteurs actuellement capables de détecter ces faibles signaux sont les **Squids** refroidis à l'**hélium** liquide (4 K) afin d'atteindre des niveaux de bruit de l'ordre du femtotesta.

Au Service de physique de l'état condensé, un nouveau type de capteurs, appelés capteurs mixtes, offre la possibilité d'atteindre cette sensibilité (encadré). Ainsi, les dispositifs actuels présentent à 4 K des bruits de près de 5 fT/√Hz et de 30 fT/√Hz à 77 K (température de l'azote liquide). La prochaine génération de capteurs mixtes, maintenant fabriqués

## Comment fonctionne un capteur mixte ?

Un capteur mixte est composé d'une boucle **supraconductrice** de grande taille contenant en un point une constriction de l'ordre du **micron** (figure). Lorsqu'un **champ magnétique** est appliqué à la boucle, un courant y est induit. Au niveau de la constriction, la **densité de courant** est très grande et un champ local est créé, plusieurs milliers de fois plus intense que le champ appliqué. Un capteur magnétique appelé **magnétorésistance géante**, de taille micrométrique, vient mesurer ce champ. Les magnétorésistances géantes issues de l'**électronique de spin** sont les capteurs de champ utilisés dans les têtes de disques durs informatiques actuels. L'ensemble permet d'atteindre une sensibilité de l'ordre du femtotesta (10<sup>-15</sup> tesla).



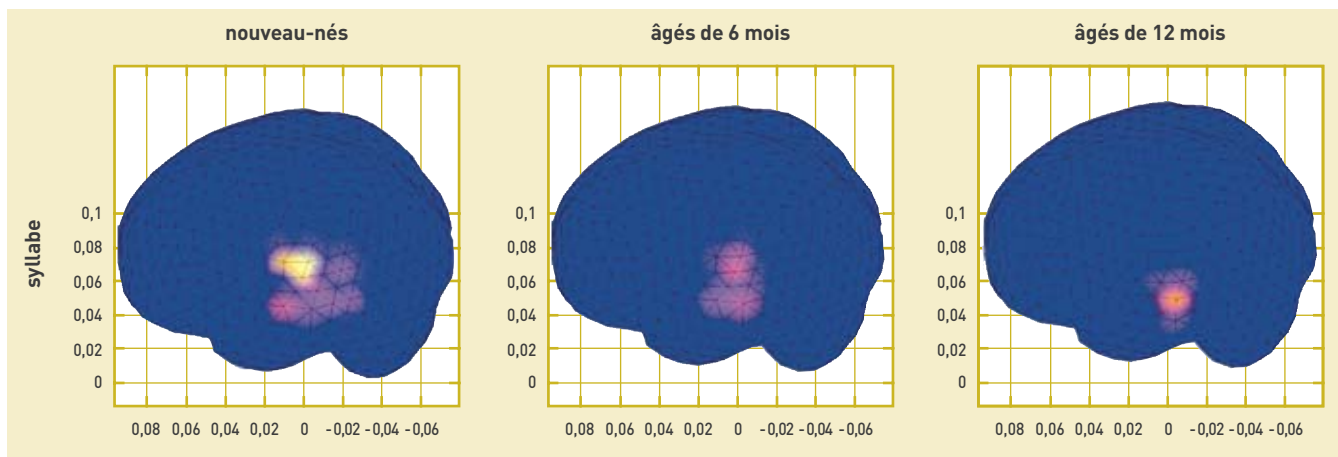
CEA

Figure. Exemple de capteur mixte. La boucle supraconductrice apparaît en bleu, le capteur magnétorésistif (en forme de C) en blanc et les contacts de mesure de la résistance en jaune.

(2) Bande gamma : rythme de l'activité cérébrale (obtenu par **transformée de Fourier** ou analyse en ondelettes d'un signal électroencéphalographique) correspondant à la bande de fréquences entre 30 et 100 Hz.

(3) Bande bêta : rythme de l'activité cérébrale correspondant à la bande de fréquences entre 15 et 30 Hz.

(4) Voir, par exemple, J. GROSS *et al.*, PNAS, 2004.



UW Institute for Learning and Brain Sciences

Réponses auditives à des syllabes enregistrées par MEG chez des nourrissons à plusieurs moments de la première année de vie. (Ces résultats ont été obtenus par l'équipe de Patricia K. Kuhl, *Institute for Learning and Brain Sciences*, université de Washington, Seattle, États-Unis).

par une entreprise allemande, devrait permettre d'atteindre  $1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  à 4 K et  $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  à 77 K. Une MEG travaillant à l'azote liquide présenterait le double avantage de ne pas nécessiter d'écran métallique, source importante de bruit, et d'être plus proche du crâne, ce qui augmenterait considérablement la robustesse et la précision des signaux, particulièrement chez l'enfant.

De plus, ces capteurs se sont révélés particulièrement bien adaptés à la détection de la **résonance magnétique** des **protons** à bas champ, ce qui laisse envisager la possibilité de construire un appareil hybride combinant la mesure MEG et l'IRM à bas champ.

### Des applications dans de nombreux domaines

Le prochain centre de magnétoencéphalographie sera ouvert à tous les laboratoires intéressés. La MEG présente en effet une variété d'applications cognitives et cliniques, et plusieurs groupes de recherche ont manifesté leur intérêt d'utiliser, à terme, cet équipement. Les projets qui pourraient démarrer à court terme s'organisent autour des grands axes de la cognition humaine, du développement du cerveau humain, et de leurs pathologies respectives.

### La cognition humaine et ses pathologies

Le cerveau humain présente des compétences uniques, par exemple, pour le langage, la lecture, le raisonnement, ou le contrôle conscient. Ces compétences sont également associées à des pathologies spécifiques. Pour ces raisons, il n'existera jamais de modèle animal entièrement satisfaisant de la dyslexie ou de la schizophrénie. C'est donc dans ces domaines propres au primate humain que l'imagerie cérébrale offre un intérêt unique de visualisation non invasive *in vivo*, auquel aucune autre méthode disponible chez l'animal ne peut se substituer.

Cela fait au moins une dizaine d'années que l'IRMf permet de décrire la distribution anatomique des réseaux cérébraux impliqués dans ces grandes fonctions cognitives. C'est pourquoi les chercheurs du CEA sont convaincus que la prochaine étape sera la *dissection temporelle des opérations cognitives humaines*. Ainsi, la plupart de leurs projets se focalisent-ils sur la compréhension de la dynamique de l'activité

cérébrale. Comment, et en combien de temps, un mot écrit ou parlé est-il traité non consciemment et perçu consciemment? Quelle séquence d'activité conduit à reconnaître d'abord sa forme, puis sa prononciation et son sens? Comment ces processus sont-ils désorganisés dans la schizophrénie ou chez les enfants dyslexiques et les adultes devenus alexiques à la suite d'un accident vasculaire cérébral? Comment l'activité cérébrale spontanée, qu'elle soit normale ou induite par une activité épileptique, interagit-elle avec ces fonctions cognitives?

### Le développement du cerveau humain et ses pathologies

Le développement du cerveau humain reste l'un des domaines les moins étudiés des neurosciences cognitives. Ce relatif désintérêt est principalement dû à un manque de méthodes appropriées d'investigation. Le laboratoire de neuro-imagerie cognitive a été le pionnier de l'imagerie du cerveau du nourrisson, d'abord en EEG, puis en IRMf. Cependant, ces méthodes restent très délicates à employer, surtout l'IRM qui présente un problème de bruit acoustique élevé. La MEG, qui est totalement silencieuse et cependant précise avec une résolution spatiale de l'ordre de 2 mm, pourrait jouer un rôle essentiel dans la caractérisation de l'activité cérébrale de l'enfant et du nourrisson. Aussi plusieurs projets soulèvent-ils des questions spécifiques au développement. Comment le cerveau du nourrisson est-il organisé pour le langage, et comment cette organisation est-elle altérée chez les enfants prématurés? Comment l'organisation cérébrale se modifie-t-elle avec l'acquisition de la lecture? Pourquoi l'apprentissage de la lecture échoue-t-il chez les enfants dyslexiques? Le domaine de l'épilepsie infantile et de ses conséquences sur le développement cognitif sera également un domaine naturel d'application clinique du centre MEG.

#### > Stanislas Dehaene

Institut d'imagerie biomédicale – NeuroSpin  
 Direction des sciences du vivant  
 CEA Centre de Saclay  
 et Claude Fermon  
 Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis)  
 Direction des sciences de la matière  
 CEA Centre de Saclay

# Les principales techniques d'imagerie médicale

L'**imagerie médicale** est une méthode unique permettant de visualiser des processus biologiques au sein même des organismes vivants, de manière non invasive. Elle est essentielle à la compréhension de leur physiologie et de leurs pathologies afin de mieux les diagnostiquer, les pronostiquer et les soigner. L'imagerie constitue donc un outil d'investigation de choix de plusieurs champs de la médecine et de la biologie.

Initiée avec la radiographie par rayons X, l'imagerie médicale a bénéficié de la découverte de la **radioactivité** artificielle et des techniques de détection associées pour se développer. Par la suite, la découverte de la **résonance magnétique nucléaire (RMN)** puis des aimants **supraconducteurs** a permis des avancées technologiques significatives dans le domaine de l'**imagerie par résonance magnétique (IRM)**.

Parmi les principales méthodes d'imagerie dynamique du cerveau humain, l'**électroencéphalographie (EEG)** permet de mesurer l'activité électrique du cerveau, provoquée par le courant généré dans les **neurones**, à l'aide d'**électrodes** placées sur le cuir chevelu (le scalp). Elle renseigne sur l'activité neurophysiologique du cerveau au cours du temps et en particulier du **cortex** cérébral, soit dans un but diagnostique en neurologie, soit dans la recherche en neurosciences **cognitives**. La **magnétoencéphalographie (MEG)** enregistre les **champs magnétiques** induits par les courants générés par les neurones au moyen de capteurs positionnés à proximité de la tête. Employée dans un but clinique en neurologie, notamment pour le cas de l'épilepsie, ainsi que dans la recherche en neurosciences cognitives, cette technique

autorise également l'étude de maladies développementales (dyslexie), psychiatriques (schizophrénie) et neurodégénératives (Parkinson, Alzheimer).

La **tomographie par émission de positons (TEP)** consiste à administrer par voie intraveineuse une **molécule** marquée avec un **isotope** radioactif afin de suivre, par détection externe, le fonctionnement normal ou pathologique d'un organe. Les **traceurs** radioactifs présentent les mêmes propriétés physico-chimiques que leurs homologues non radioactifs si ce n'est qu'ils possèdent la particularité d'émettre un rayonnement. Ils servent donc de balise pour suivre, à l'aide d'outils de détection appropriés, le cheminement d'une molécule préalablement marquée dans l'organisme. Les valeurs ainsi recueillies sont ensuite analysées et transformées à l'aide d'un modèle mathématique afin de permettre la reconstruction à l'écran d'une image représentant la position du radiotracer dans l'organisme. La TEP est aujourd'hui largement utilisée pour des études physiologiques et physiopathologiques de la **cognition** et du comportement, ainsi que pour l'étude de différentes pathologies affectant le système nerveux central telles que l'épilepsie, l'ischémie cérébrale, les accidents vasculaires cérébraux et les maladies neurodégénératives (Parkinson, Huntington...).

L'**imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM)** est une méthode d'ima-

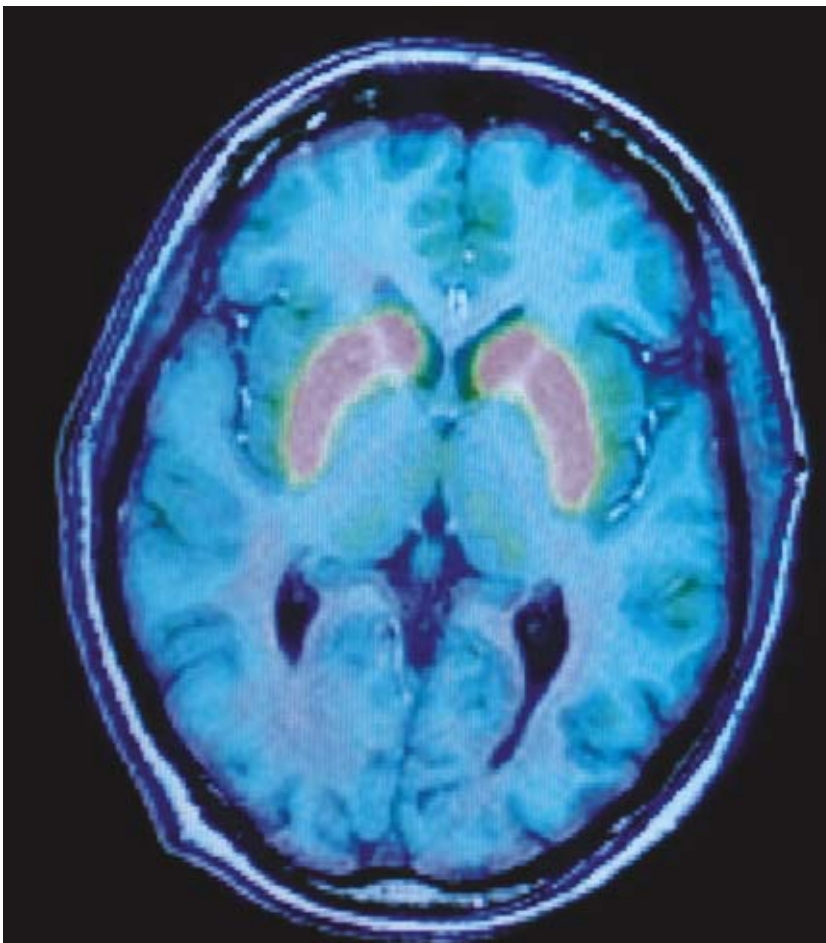
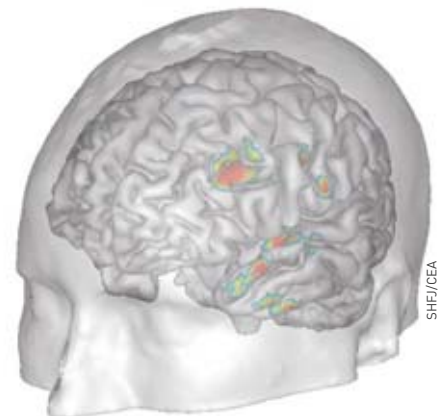


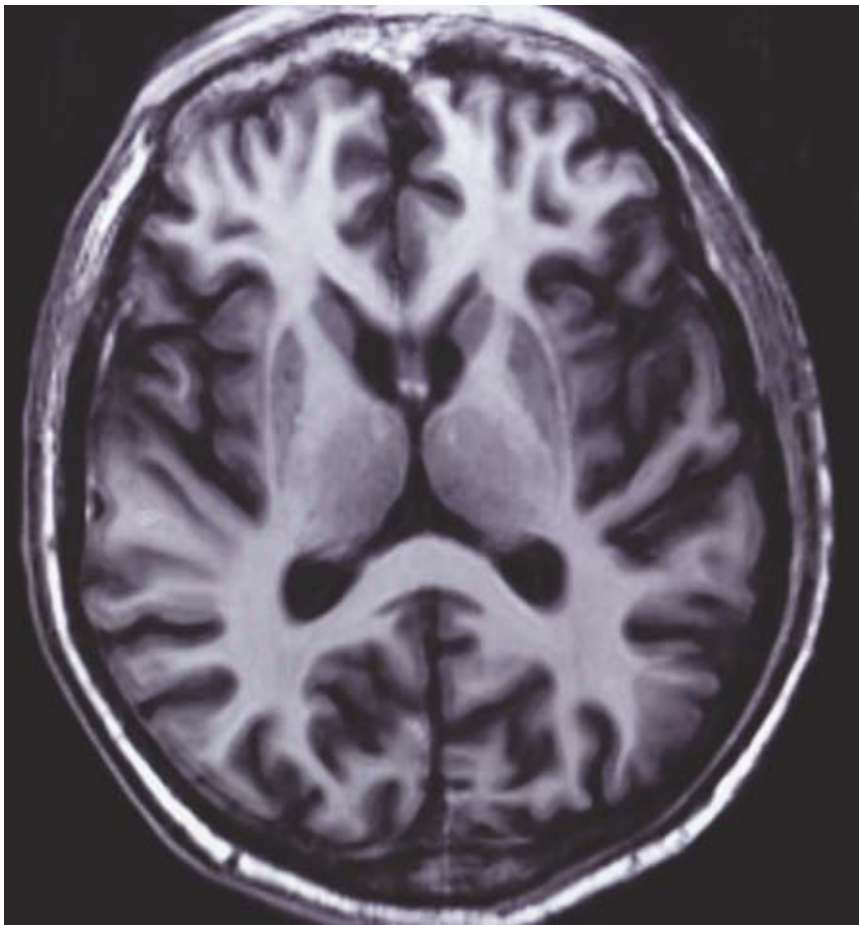
Image en TEP. Les positons émis par les traceurs radioactifs préalablement injectés au patient sont détectés par la caméra TEP, ce qui permet, après analyse informatique, de reconstituer une image en 3D de l'organe étudié.



Dépression mélancolique. Fusion d'images en TEP mesurant l'activité énergétique régionale avec l'image en IRM du cerveau d'un patient. Les zones hypoactivées sont détectées individuellement.

P. Stroppa/CEA

SHF/CEA



P. Stropas/CEA

Image acquise avec le système IRM de 3 T du SHFJ situé à Orsay (Essonne). Cette technique permet une analyse très fine des lésions infectieuses ou inflammatoires, des anomalies des vaisseaux, ainsi que des tumeurs.

gerie fonctionnelle d'investigation *in vivo* non traumatique. Capable d'étudier des tissus dits mous, tels que le cerveau, la moelle épinière, les muscles, elle permet d'en connaître la structure anatomique, mais également d'en suivre le fonctionnement ou le **métabolisme**. Il s'agit dans le premier cas d'une **IRM anatomique (IRMa)**, dans le deuxième d'une **IRM fonctionnelle (IRMf)** et dans le troisième de la **spectroscopie IRM (SRM)**.

L'IRM utilise le phénomène de la **RMN**, technique de **spectroscopie** découverte en 1946 qui tire profit des propriétés magnétiques des **noyaux atomiques**. Certains noyaux, ceux d'**hydrogène** par exemple, sont dotés d'un petit **moment magnétique** ou **spin**. La RMN consiste à détecter les variations de l'**aimantation** des noyaux atomiques sous l'action d'un champ magnétique extrêmement puissant et d'une **onde électromagnétique** excitatrice. Lors de l'application d'une onde électromagnétique de fréquence adaptée, la **fréquence de résonance**, ces noyaux changent d'orientation puis émet-

tent des signaux en retrouvant leur position d'origine. Avec les progrès de l'informatique et des champs magnétiques, la RMN est passée de la physique de la matière condensée à l'analyse chimique puis à la biologie structurale, et plus récemment à l'imagerie médicale.

**L'IRM anatomique.** L'IRM offre la possibilité de visualiser l'anatomie d'organes profonds et opaques. En observant, sous l'effet d'un champ magnétique intense, la résonance des noyaux d'hydrogène, présents en abondance dans l'eau et les graisses des tissus biologiques, cette technique permet en particulier de visualiser le cerveau en coupes montrant les détails des structures cérébrales (**matière grise, matière blanche**) avec une précision millimétrique. Cette image-

rie "anatomique" est utilisée par les radiologues pour la détection et la localisation de lésions cérébrales.

**L'IRM fonctionnelle.** Plus récemment, grâce à la vitesse d'acquisition et de traitement de données, l'IRM est aussi devenue "fonctionnelle", révélant l'activité des différentes structures qui composent notre cerveau. Quand nous parlons, lisons, bougeons, pensons..., certaines aires de notre cerveau s'activent. Cette activation des neurones se traduit par une augmentation du débit sanguin local dans les régions cérébrales concernées. C'est cette augmentation locale et transitoire de débit sanguin, et non directement l'activité des neurones, qui peut être détectée par l'IRMf du fait de l'aimantation de l'**hémoglobine** contenue dans les globules rouges.

**L'IRM de diffusion (IRMd).** C'est un outil puissant pour mesurer, à l'échelle microscopique, les mouvements des molécules d'eau et établir ainsi l'architecture fine du tissu neuronal et de ses variations. Elle offre une mesure plus directe que les méthodes d'imagerie classiquement utilisées. Elle permet de sonder la structure des tissus à une échelle bien plus fine que la **résolution** des images IRM et se révèle plus rapide.

La **spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (SRM)** complète cette palette de technologies en fournissant une méthode non invasive d'étude de la biochimie et du métabolisme du système nerveux central. Elle permet la quantification précise de plusieurs dizaines de molécules et est basée sur le même principe que l'IRM.



V. El Kouby, M. Perrin, C. Poupponet, J.-F. Mangin, SHFJ/CEA

L'IRMd permet le diagnostic très précoce de certaines pathologies et la visualisation des faisceaux de fibres (matière blanche) qui relient les différentes régions cérébrales.

# Supraconductivité et supraconducteurs



Un des principaux domaines d'application de la supraconductivité est l'imagerie médicale. Ici, l'imager par résonance magnétique de 3 teslas du SHFJ situé à Orsay (Essonne).

## Un peu d'histoire

Des trains qui "volent" en lévitation magnétique au-dessus de leur voie, le problème du stockage de l'électricité enfin résolu grâce à d'énormes bobines magnétiques, un appareillage électrotechnique et des câbles de transport électrique qui ne présentent plus de pertes, des champs magnétiques pour explorer le corps humain et en livrer des images toujours plus précises : la supraconductivité n'a cessé de faire rêver depuis qu'en 1911, le Néerlandais Heike Kammerlingh-Onnes a découvert la propriété extraordinaire qu'ont les matériaux supraconducteurs de présenter, en dessous d'une température qualifiée de température critique (qui dépend de la masse isotopique), une résistance électrique si faible qu'elle n'est pas mesurable. Il fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1913. Outre une résistance nulle et une conductivité électrique sans entrave, les supraconducteurs découverts par Kammerlingh-Onnes (ils seront plus tard qualifiés de type I) possèdent une autre propriété remarquable qui se manifeste par l'effet Meissner, découvert en

1933 par le chercheur allemand Walter Meissner et son compatriote Robert Ochsenfeld. Ils offrent un diamagnétisme parfait (si on néglige la longueur de pénétration de London<sup>(1)</sup>), c'est-à-dire que le champ magnétique en est totalement expulsé tant que le champ est inférieur au champ critique alors qu'un matériau parfaitement conducteur devrait présenter un champ égal au champ appliqué. Là réside la deuxième barrière qui limite encore l'application des supraconducteurs : au-dessus d'un champ magnétique critique, la supraconductivité disparaît. Les physiciens ont longtemps cru qu'il n'existait qu'un type de supraconductivité et que les anomalies magnétiques constatées dans certains échantillons n'étaient dues qu'à la présence d'impuretés. Mais dès les années 50, le Russe Vitaly L. Ginzburg émettait l'idée, avec son compatriote Lev Davidovitch Landau,

(1) En 1935, Fritz et Heinz London introduisirent une autre explication de l'effet Meissner en émettant l'idée que le champ magnétique décroît à partir de la surface du supraconducteur sur une longueur caractéristique  $\lambda_L$ , appelée longueur de pénétration.

qu'il existait en fait deux types de supraconducteurs.

Ce n'est qu'en 1957 que le Russo-Américain Alexei A. Abrikosov identifia la supraconductivité de type II, présentant une aimantation complètement différente caractérisée par l'état mixte et autorisant la supraconductivité en présence de champs magnétiques très élevés. De fait, les supraconducteurs de ce type n'obéissent pas à l'effet Meissner. Les travaux d'Abrikosov lui vaudront en 2003 le prix Nobel de physique avec Ginzburg et l'Anglo-Américain Anthony J. Leggett. Et ce n'est qu'en cette même année 1957 que les Américains John Bardeen, Leon N. Cooper et John R. Schrieffer purent proposer une théorie de la supraconductivité, distinguée par le prix Nobel de physique en 1972. D'après la théorie BCS (initiales de leurs noms), les électrons se déplacent par paires de Cooper (deux électrons de spins opposés) en formant des bosons (de spin nul), condensés dans un seul état quantique, sous l'effet de phonons, phénomène vibratoire également quantique. Cette interaction entre électrons et phonons est à l'origine de la

**résistivité** et de la supraconductivité. Attirés par le passage très rapide d'un électron ( $10^6$  m/s), les **ions** se déplacent et génèrent une zone électriquement positive qui le demeure après ce passage, permettant l'attraction d'un nouvel électron qui s'apparie au premier en dépit de la **répulsion coulombienne**. Cette configuration ne résiste toutefois pas à l'**agitation thermique**, ce qui explique pourquoi la température est l'ennemi du phénomène de supraconductivité.

La théorie BCS, valable pour les **supraconducteurs** dits **conventionnels**, ne permettait d'ailleurs pas d'envisager l'apparition de la supraconductivité à des températures relativement élevées, c'est-à-dire supérieures à celle de l'azote liquide (77 K, soit -196 °C), *a fortiori* à la température ambiante. Ce palier des 77 K fut atteint avec des composés tels que Y-Ba-Cu-O (les records sont actuellement de l'ordre de 165 K, à pression élevée, et de 138 K, soit -135 °C, à pression normale). L'Allemand Johannes Georg Bednorz et le Suisse Karl Alexander Müller se virent décerner en 1987 le prix Nobel pour la découverte des **supraconducteurs non conventionnels** sous forme de matériaux à structure **pérovskite** de cuivre à base de lanthane qui présentent une supraconductivité à une température de 35 K (-238 °C). En remplaçant le lanthane par de l'yttrium, en particulier dans l' $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , il a été par la suite possible d'augmenter sensiblement la température critique et de développer la famille des cuprates, supraconducteurs efficaces mais difficiles à mettre en œuvre pratiquement pour l'électrotechnique dans la mesure où ce sont des céramiques. Les **supraconducteurs à haute température critique** sont tous des supraconducteurs de type II.

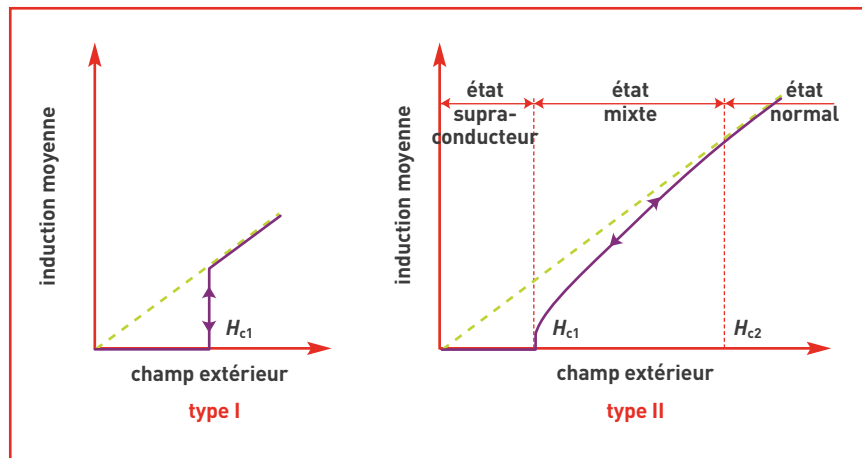


Figure 1. Induction moyenne dans des supraconducteurs de type I et de type II en fonction du champ extérieur.

### Le magnétisme étrange des supraconducteurs de type II

En présence d'un champ magnétique, les supraconducteurs de type II offrent un diamagnétisme parfait jusqu'au champ  $H_{c1}$  de manière comparable aux supraconducteurs de type I. À partir de  $H_{c1}$ , le supraconducteur de type II est dans l'état mixte qui autorise une pénétration partielle du champ jusqu'au champ  $H_{c2}$  (figure 1) et donc une supraconductivité à haut champ. L'état mixte se présente comme un ensemble de cœurs à l'état normal qui emplissent le matériau supraconducteur à partir de  $H_{c1}$ , chacun contenant un quantum de flux ( $2,07 \cdot 10^{-15}$  weber) et entouré d'un vortex de courants supraconducteurs (figure 2). Lorsque le champ magnétique augmente, le réseau se densifie jusqu'à combler complètement le matériau supraconducteur à  $H_{c2}$ .

La distinction entre les deux types de supraconductivité est très liée à la notion de longueur de cohérence  $\xi$  et à la notion de pro-

fondeur de pénétration  $\lambda_L$ , qui caractérisent l'interface entre une région normale et une région supraconductrice.  $\xi$  représente la variation spatiale de l'état supraconducteur (densité d'électrons supraconducteurs) et  $\lambda_L$  la longueur de pénétration de London du champ magnétique. Le rapport de ces deux longueurs caractéristiques, appelé **paramètre de Ginzburg-Landau** et noté  $\kappa$  ( $\kappa = \lambda_L/\xi$ ) détermine le type de supraconductivité. Si  $\kappa < \sqrt{2}/2$ , le supraconducteur est de type I, si  $\kappa > \sqrt{2}/2$ , le supraconducteur est de type II.

À l'interface, la pénétration du champ magnétique, définie par  $\lambda_L$ , correspond à une augmentation de l'énergie libre dans le matériau supraconducteur, tandis que la constitution de l'état supraconducteur, caractérisée par la longueur de cohérence, se rapporte à une diminution de l'énergie libre. Le bilan énergétique de l'interface dépend du rapport  $\kappa$ . Dans le cas des supraconducteurs de type II, l'état mixte résulte

Suite page 18

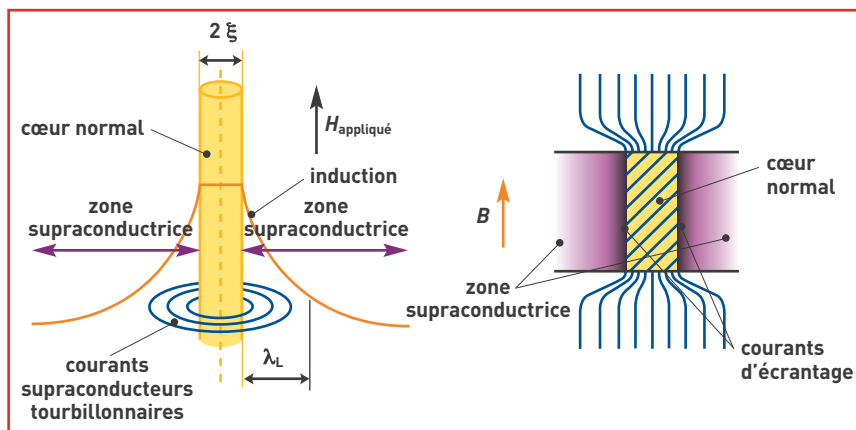
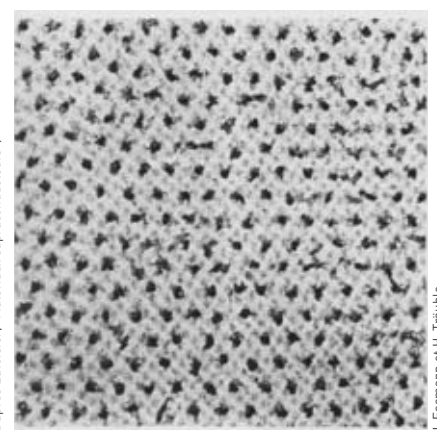


Figure 2. Schéma d'un vortex mettant en évidence la longueur de cohérence et la profondeur de pénétration.



Décoration magnétique de la surface d'un supraconducteur dans l'état mixte.

matériau		$\xi$ ( $\mu\text{m}$ ) 0 K	$\lambda_L$ ( $\mu\text{m}$ ) 0 K	$\kappa$	$T_c$ (K)	$\mu_0 \cdot H_{c1}$ (teslas) 0 K	$\mu_0 \cdot H_{c2}$ (teslas) 0 K
type I	Al	1,36	0,05	0,04	1,18	0,010 5	
	Pb	0,083	0,037	0,5	7,18	0,080 3	
type II	NbTi	0,005	0,3	60	9,25	0,01	14
	Nb <sub>3</sub> Sn	0,003 6	0,065	18	18	0,017	25,5
	YBaCuO	plan	0,003	plan 0,8	$\approx 300$	93	
axe c		0,000 6	axe c 0,2				

Tableau. Les caractéristiques de quelques supraconducteurs de type I et de type II.  $\mu_0 \cdot H_{c1}$  et  $\mu_0 \cdot H_{c2}$  représentent les inductions magnétiques,  $\mu_0$  étant la perméabilité magnétique du vide (et du matériau dans le cas présent).

Suite de la page 17  
donc de la création d'un grand nombre d'interfaces. Chaque interface correspond en effet à un bilan négatif d'énergie qui rend énergétiquement favorable la supraconductivité au-delà de  $H_{c1}$  (tableau).

**Les applications**

Du point de vue des applications, la supraconductivité de type I ne présente pas grand intérêt. La température critique, qui limite donc les applications de la supraconductivité, est malheureusement très faible dans le cas des deux supraconducteurs qui autorisent aujourd'hui des applications concrètes : le **niobium-titane NbTi** (9,2 K) – les premiers câbles supraconducteurs en alliage niobium-titane sont apparus au début des années soixante – et le **niobium-étain Nb<sub>3</sub>Sn** (18 K). La mise en œuvre de leur supraconductivité nécessite une réfrigération à la température de l'hélium

liquide [4,2 K]<sup>(2)</sup>, température qui a constitué le premier jalon vers la température ambiante, véritable Graal de la supraconductivité.

Si les supraconducteurs de type II peuvent supporter des champs magnétiques très élevés, ils sont également capables de transporter des densités de courant impressionnantes, jusqu'à une valeur elle aussi critique, fonction du champ magnétique (figure 3) : les premiers **aimants** supraconducteurs vont ainsi apparaître. Dans ces conditions, les densités de courant possibles sont très grandes devant celles qui sont réalisables dans l'électrotechnique domestique ou industrielle (de l'ordre de 10 A/mm<sup>2</sup>). Depuis les années soixante-dix, le CEA s'intéresse essentiellement aux applications liées à la production de champs magnétiques **permanents** intenses dans des grands volumes (**confinement magnétique** de **plasmas de fusion**, physique des particules, imagerie médicale).



La découverte de la supraconductivité à haute température critique a rendu possible la vision directe à l'air libre d'une manifestation de la supraconductivité qui est celle de l'aimant flottant au-dessus d'une pastille d'YBaCuO refroidie à l'azote liquide et qui est maintenant bien connue.

Ce sont en fait les applications largement dominantes des supraconducteurs de type II, essentiellement le NbTi<sup>(3)</sup>. Dans ce cas, la supraconductivité permet d'économiser une puissance électrique considérable, même en prenant en compte le rendement **cryogénique** des installations, qui fait qu'un watt dissipé à 4,2 K nécessite de dépenser au minimum 300 W à la température ambiante pour les installations industrielles de très grande puissance. Certains chercheurs dans le monde entier rêvent toujours d'une supraconductivité à température ambiante, mais la supraconductivité appliquée semble encore liée pour longtemps à la réfrigération à très basse température.

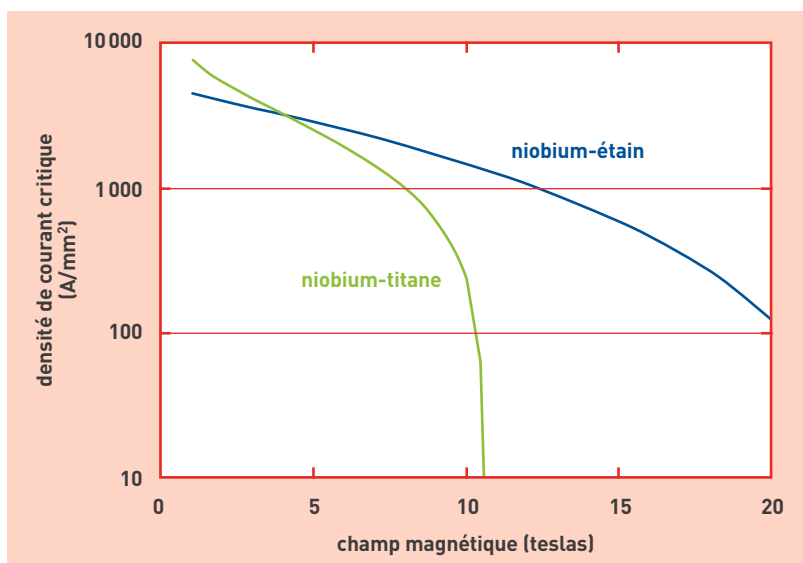


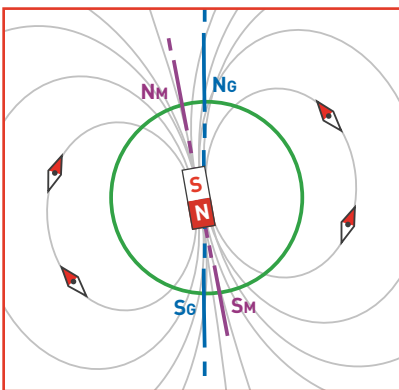
Figure 3. Densités de courant critique caractéristiques en fonction du champ magnétique à 4,2 K pour les deux matériaux supraconducteurs les plus utilisés, notamment pour la fabrication d'aimants supraconducteurs.

(2) Il faudrait en fait faire remonter l'histoire de la supraconductivité à William Ramsay qui, en 1895, fut le premier à isoler l'hélium. Que serait en effet la supraconductivité sans l'hélium qui est le vecteur de la réfrigération à très basse température? Rappelons que Kammerlingh-Onnes finit par liquéfier l'hélium en 1908 après les tentatives infructueuses de James Dewar à la fin du dix-neuvième siècle, ouvrant la voie à la découverte de la supraconductivité.

(3) Sa production est de l'ordre de 1 500 à 2 000 tonnes par an.

# Le champ terrestre, faible mais vital

La Terre possède son propre **champ magnétique**, se comportant comme un énorme **aimant**. Son étude relève du **géomagnétisme**. Ce champ peut, en première approximation, être assimilé à celui d'un **dipôle** centré dont l'axe ne coïncide d'ailleurs pas avec celui de la rotation de la Terre puisqu'ils forment actuellement un angle de  $11,5^\circ$ , valeur qui évolue au cours du temps en fonction des mouvements du noyau de la planète (figure).



L'angle formé entre la direction du pôle nord **magnétique** et celle du pôle nord **géographique**, ou **déclinaison magnétique**, varie d'un point de la surface du Globe à l'autre. L'angle formé par le vecteur du champ magnétique et la surface terrestre est l'**inclinaison magnétique**.

Au dipôle centré sont associées des lignes de champ magnétique qui relient le pôle Sud au pôle Nord. Les deux points où les **lignes de champ** convergent et sont verticales à la surface du globe correspondent aux **pôles magnétiques**, respectivement situés aujourd'hui au Canada et en Terre Adélie. Le pôle Nord magnétique (qui correspond au pôle Sud de l'aimant que constitue la planète) est celui sur lequel s'aligne l'aiguille des boussoles.

Le champ magnétique terrestre est un champ relativement faible, de l'ordre de  $0,5$  **gauss**, soit  $5 \cdot 10^{-5}$  **tesla** (valeur à Paris, par exemple). Il est créé par l'**effet dynamo** engendré par les mouvements du noyau de la planète. Le pôle Nord magnétique se déplace d'une centaine de kilomètres par an. Même si l'intensité du dipôle n'est pas très forte, les lignes du champ dipolaire forment un écran vis-à-vis de toute particule chargée et mettent les Terriens à l'abri des rayonnements cosmiques. Comme d'autres planètes du système solaire (Mercure, Jupiter, Saturne, Uranus

et Neptune), la Terre possède ainsi une **magnétosphère** qui protège sa surface du vent solaire mais ce dernier déforme les lignes de son champ magnétique.

Le champ magnétique terrestre est loin d'être uniforme. Il présente des **anomalies magnétiques**, déviations de la force du champ constatées par rapport au modèle global, qui peuvent être importantes à l'échelle de toute une région. C'est le cas de l'**anomalie de l'Atlantique Sud**, qui n'est pas sans conséquence sur la dose de rayons cosmiques reçue par les équipages et les passagers des avions et des vaisseaux spatiaux qui la traversent.

D'autres composantes plus faibles du champ magnétique terrestre, dites **non dipolaires**, se superposent au dipôle principal et ont des constantes de temps beaucoup plus courtes que celles du dipôle ; elles n'ont pas d'effet significatif au-delà de la surface terrestre.

Au cours des temps géologiques, le champ magnétique de la Terre a subi de fortes fluctuations, vécu des périodes d'instabilité importantes dont aucune n'est véritablement périodique, et connu plusieurs inversions de ses pôles magnétiques. En témoignent les empilements de coulées de lave ou les séquences sédimentaires qui s'accumulent au fond des océans. Ces deux types de roches ont, en effet, la capacité de rester magnétisées dans la direction du champ magnétique existant lors de leur refroidissement à la **température de Curie** (**point de Curie**), un peu en dessous de  $500^\circ\text{C}$ , et donc de garder la mémoire du champ magnétique régnant à la surface du Globe pendant ce refroidissement (ou pendant leur dépôt *via* les petits grains magnétiques qui les composent). C'est le phénomène de **rémanence magnétique** qui a permis le développement du **paléomagnétisme**. La direction du champ rémanent, qui peut être complètement différente de la direction du champ local actuel, est caractéristique du champ local lors de la formation de la roche. Les roches volcaniques, après avoir traversé l'écorce terrestre à une température supérieure au point de Curie des minéraux qui les composent, se refroidissent et s'aimantent sous l'effet du champ terrestre au passage de ce point dans le sens inverse. Moins sensibles au phénomène, les roches sédimentaires voient les particules magnétiques s'orienter dans la direction du champ terrestre lors de la sédimentation et conser-

ver cette orientation. Les sédiments qui se déposent dans les fonds océaniques contiennent des minéraux magnétiques dont le plus facile à détecter est la célèbre magnétite. Cette aimantation est proportionnelle à l'intensité du champ et n'évolue pas à la température ordinaire. Mais d'autres facteurs influent sur l'aimantation rémanente : l'action continue du champ terrestre, les champs intenses ponctuels (dus par exemple à la foudre) et la cristallisation qui peut en modifier l'intensité ou la direction.

## Renversements et excursions du champ

Le champ magnétique terrestre connaît deux types d'instabilités, les **renversements** et les **excursions**. Les renversements correspondent à des inversions des pôles Sud et Nord magnétiques, dont la plus récente a eu lieu il y a environ 790 000 ans. Ce type d'inversions a été mis en évidence pour la première fois en 1906 en France par Bernard Bruhnes, mais il a fallu attendre les années 1960 pour que les études se multiplient et établissent que ces phénomènes d'inversion sont vraiment une caractéristique globale du champ magnétique terrestre. Elles ont surtout montré qu'ils se produisaient de façon erratique et imprédictible, avec une alternance de polarité stable pendant de longues périodes (plusieurs centaines de milliers d'années) et de renversements rapides (quelques milliers d'années) et que le taux de renversement avait augmenté au cours de la dernière centaine de millions d'années, passant de un, au début de cette période, à quatre renversements par million d'années pendant les cinq derniers millions d'années, la période "normale" actuelle semblant donc "anormalement" longue.

Les excursions géomagnétiques sont des instabilités de plus courte durée. Si, comme pour les inversions, la polarité s'inverse complètement, la polarité initiale se rétablit aussitôt. Les études menées au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/CEA-CNRS-université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines) ont montré que la durée d'une excursion est de l'ordre de 1500 ans, apportant une première vérification de la théorie du géophysicien anglais David Gubbins selon laquelle les excursions ne se produisent que dans le noyau externe **fluide** de la Terre et non pas dans le noyau **solide**.

# Les différentes formes de magnétisme

Le **magnétisme** trouve essentiellement son origine dans les propriétés des **électrons** telles qu'elles sont expliquées par la **physique quantique**. Leur état quantique de **spin** est responsable d'une première partie du magnétisme (*magnétisme de spin*). Une deuxième partie est imputable au mouvement orbital des électrons autour du noyau de l'**atome** (*magnétisme orbital*) et également au magnétisme du **noyau** lui-même (*magnétisme nucléaire*), notamment mis à profit dans les techniques d'imagerie médicale par **résonance magnétique nucléaire**. Le magnétisme est donc produit par des charges électriques en mouvement. La force agissant sur ces charges, dite **force de Lorentz**, traduit la présence d'un **champ magnétique**.

L'électron possède un **moment magnétique** élémentaire (le **quantum** magnétique étant le *magnéton* imaginé par Bohr) qui peut être associé à l'image de son mouvement de rotation du **spin** sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, orienté vers le haut ou vers le bas. Le **nombre quantique de spin** (un des quatre nombres qui "quantifient" les propriétés de l'électron) est égal à  $1/2$  ( $+ 1/2$  ou  $- 1/2$ ). Une paire d'électrons ne peut occuper la même *orbitale* que si l'un et l'autre sont de moments magnétiques opposés.

Chaque atome peut être assimilé à un petit aimant porteur d'un moment magnétique élémentaire. Le spin du noyau (**neutron** et **proton** ont eux-mêmes un spin demi-entier) est demi-entier si le **nombre de masse** est impair ; nul si le nombre de masse et la charge sont pairs, et entier si le nombre de masse est pair et la charge impaire.

De nombreux moments magnétiques peuvent, à une échelle plus importante, constituer des **domaines magnétiques** dans lesquels tous ces moments sont orientés

dans la même direction. Ces régions de l'espace sont séparées entre elles par des **parois**. Rassemblés, ces domaines peuvent eux-mêmes constituer un **aimant** à l'échelle macroscopique (figure E1).

De l'organisation de ces constituants élémentaires dépend la manifestation de différents types de magnétisme, associés traditionnellement à trois grandes familles de matériaux : *ferromagnétiques*, *paramagnétiques* et *diamagnétiques*.

Tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont par définition paramagnétiques, dans la mesure où leur **susceptibilité magnétique** est positive, mais cette susceptibilité est particulièrement élevée dans les ferromagnétiques, qui constituent donc en eux-mêmes une famille.

1. Les matériaux **ferromagnétiques** sont constitués de petits domaines à l'intérieur desquels les atomes, présentant une **aimantation** parallèle, tendent à s'aligner comme autant de **dipôles** élémentaires dans la direction d'un **champ magnétique** extérieur. Les moments magnétiques de chaque atome peuvent s'aligner spontanément dans ces domaines, même en l'absence de champ extérieur. En présence d'un tel champ, les parois se déplacent et tendent à renforcer le champ appliqué. Si celui-ci dépasse une certaine valeur, le principal domaine orienté dans la direction du champ tendra à occuper tout le volume du matériau. Si le champ diminue, les parois se déplacent, mais pas de façon symétrique, une partie du mouvement "aller" des parois étant irréversible : il subsiste donc une **magnétisation rémanente**, importante dans les aimants proprement dits ou la magnétite naturelle.

L'ensemble du processus constitue un **cycle d'hystérésis**, la relation du champ induit au champ extérieur dessinant une *boucle*

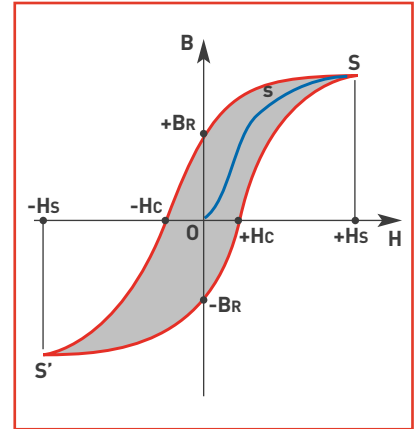


Figure E2. L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type OS sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend vers zéro ; cette induction rémanente ne peut être annulée que par une inversion du champ magnétique jusqu'à une valeur de champ "coercitif". Le cycle d'hystérésis traduit des pertes "par frottement" entre les domaines magnétiques. Ces pertes sont représentées par la surface que délimitent les courbes d'aimantation et de désaimantation.

ou *courbe d'hystérésis* dont la surface représente l'énergie perdue dans la partie irréversible de ce processus (figure E2). Pour annuler le champ induit, il faut appliquer un **champ coercitif** : les matériaux avec lesquels les aimants permanents artificiels sont réalisés présentent une valeur élevée de champ coercitif.

En général, le moment magnétique total des matériaux ferromagnétiques est nul, les différents domaines ayant des orientations différentes. Le ferromagnétisme disparaît si on dépasse une certaine température appelée **point de Curie**.

Le couplage collectif des spins entre centres métalliques du matériau ou d'un complexe de **métaux de transition** explique les propriétés magnétiques du matériau, les moments de tous les spins se trouvant tous orientés de manière identique.

Les matériaux dont les atomes sont éloignés les uns des autres dans leur structure **crystalline** favorisent un alignement de ces aimants élémentaires par couplage. Le fer, mais aussi le cobalt, le nickel et leurs **alliages**, en particulier les aciers, et certains de leurs composés appartiennent à cette catégorie caractérisée par une susceptibilité magnétique positive et très élevée, ainsi que,

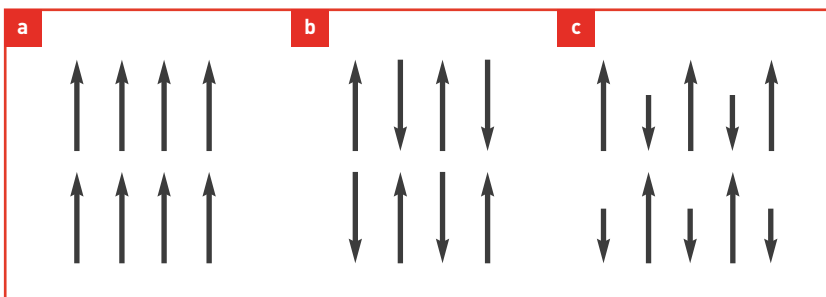


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposés et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



Stoiber Productions, München

Arrivée à la gare routière de Long Yang, à Shanghai (Chine), d'un train à sustentation magnétique du type Transrapid, d'origine allemande, mis en service en 2004 pour relier la ville à l'aéroport international de Pudong.

plus faiblement, certains métaux de la famille des **terres rares**, quelques alliages dont les mailles sont grandes et certaines combinaisons d'éléments n'appartenant pas eux-mêmes à cette famille.

Dans les matériaux **ferrimagnétiques**, les domaines magnétiques constituent des ensembles pouvant être alignés dans des sens opposés (anti-parallèles), mais leur moment magnétique résultant diffère de zéro alors que le champ extérieur est nul (exemples de la magnétite, de l'ilménite ou des oxydes de fer). Le ferrimagnétisme s'observe dans des matériaux comportant deux types d'atomes se comportant comme des aimants de force différente et orientés en sens contraire. Si la somme des moments parallèles et anti-parallèles est nulle, il s'agit d'**anti-ferromagnétisme** (exemple du chrome ou de l'hématite). En effet, si les atomes sont plus rapprochés, la disposition la plus stable est celle d'aimants antiparallèles, chacun compensant en quelque sorte son voisin (figure E1).

**2.** Les matériaux **paramagnétiques** présentent un comportement de même nature que les ferromagnétiques, bien que beaucoup moins intense (leur susceptibilité magnétique est positive mais très faible, de l'ordre de  $10^{-3}$ ). Chaque atome d'un tel matériau a un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, les moments magnétiques s'orientent et augmentent ce champ, qui décroît cependant avec la température, l'agitation thermique désorientant les dipôles élémentaires. Les matériaux paramagnétiques perdent leur aimantation dès qu'ils ne sont plus soumis au champ magnétique. La plupart des métaux, y compris des alliages d'éléments ferromagnétiques, font partie de cette famille, ainsi que des minéraux comme la pegmatite.

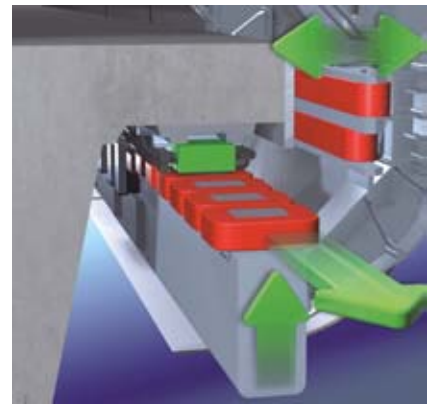
**3.** Les matériaux **diamagnétiques** présen-

tent une susceptibilité magnétique négative et extrêmement faible (de l'ordre de  $10^{-5}$ ). La magnétisation induite par un champ magnétique s'opère dans la direction opposée à ce dernier : ils ont donc tendance à s'éloigner le long de ses **lignes de champ** vers les zones de faible champ. Un diamagnétique parfait offrirait une résistance maximale au passage du champ magnétique et présenterait une **perméabilité** nulle. Les métaux comme l'argent, l'or, le cuivre, le mercure ou le plomb, le quartz, le graphite, les gaz rares ainsi qu'une grande majorité des composés organiques se rangent dans cette catégorie.

En fait, tous les corps présentent peu ou prou ce phénomène de diamagnétisme, imputable à la déformation des orbitales électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur, phénomène réversible avec la disparition du champ extérieur. Comme Michael Faraday l'a montré en son temps, toute substance est donc plus ou moins "magnétisable" pour autant qu'elle soit placée dans un champ magnétique suffisamment intense.

### L'électromagnétisme

C'est le Danois Hans Christian Ørsted, professeur à l'Université de Copenhague qui, le premier, a fait autour de 1820 le lien entre les deux domaines jusqu'alors complètement séparés de l'**électricité** et du **magnétisme**. Il a mis en évidence la déviation de l'aiguille d'une boussole à proximité d'un fil parcouru par un courant électrique, avant que Faraday n'énonce la loi qui porte son nom : le champ magnétique produit est d'autant plus fort que l'intensité du courant est importante. La discipline qui étudie les champs magnétiques statiques (ne dépendant pas du temps) est la **magnétostatique**. Le **champ magnétique** forme, avec le **champ**



Vue de détail des aimants pour le guidage et la propulsion du train.

**électrique**, les deux composantes de l'**électromagnétisme**. Des ondes peuvent se propager librement dans l'espace, et dans la plupart des matériaux, dans tous les domaines de longueur d'onde (ondes radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma). Les **champs électromagnétiques** sont donc une combinaison de **champs de force** électriques et magnétiques naturelle (le champ magnétique terrestre) ou non (de basses fréquences comme les lignes et les câblages électriques, ou de plus haute fréquence comme les ondes radio (téléphone cellulaire compris) ou de télévision).

Mathématiquement, les lois de base de l'électromagnétisme sont résumées dans les quatre **équations de Maxwell** (ou **de Maxwell-Lorentz**) qui permettent de décrire l'ensemble des phénomènes électromagnétiques de manière cohérente, de l'électrostatique et la magnétostatique à la propagation des ondes. James Clerk Maxwell les a formulées en 1873, trente-deux ans avant qu'Albert Einstein ne place la théorie de l'électromagnétisme dans le cadre de la **relativité restreinte**, qui expliquait ses incompatibilités avec les lois de la physique classique.