

L'imagerie par résonance magnétique à ultra-haut champ



A. Gennin/CEA

Mieux comprendre le cerveau humain, son fonctionnement, son développement et ses dysfonctionnements constitue l'un des défis majeurs du XXI^e siècle.

L'imagerie biomédicale se heurte aujourd'hui encore à un certain nombre de contraintes techniques qui limitent ses potentialités. Pour dépasser et repousser à l'extrême les limites actuelles de l'imagerie cérébrale par résonance magnétique nucléaire (IRM) à haut champ, le CEA s'est doté d'une plate-forme de neuro-imagerie en champ intense NeuroSpin implantée sur le centre de Saclay (Essonne). NeuroSpin est d'ores et déjà équipé de trois systèmes IRM, le premier à haut champ de 3 teslas, le deuxième à très haut champ de 7 teslas, tous deux dédiés aux études cliniques et aux examens chez l'homme, et le troisième à ultra-haut champ de 17,65 teslas réservé aux études chez le petit animal. NeuroSpin disposera en 2011 d'un système à ultra-haut champ de 11,7 teslas, d'une puissance à ce jour inégalée, destiné aux études chez l'homme. Compte tenu de la valeur du champ magnétique et du volume exigés, la réalisation de son aimant, qui fait l'objet d'un partenariat franco-allemand, sera une première mondiale.

La galerie du bâtiment NeuroSpin. La plate-forme de neuro-imagerie cérébrale NeuroSpin offre une combinaison d'instruments, de matériels et d'expertises nécessaires pour permettre à la communauté scientifique de comprendre le fonctionnement du cerveau.

Repousser les limites de l'imagerie cérébrale : les promesses du 11,7 T

Installé à partir de 2011 à NeuroSpin, le futur système d'imagerie par résonance magnétique IRM de 11,7 teslas constitue une première mondiale. Doté du plus haut champ magnétique statique pour l'homme, ce système unique a pour objectif d'explorer le cerveau avec une précision jamais atteinte jusqu'à présent.

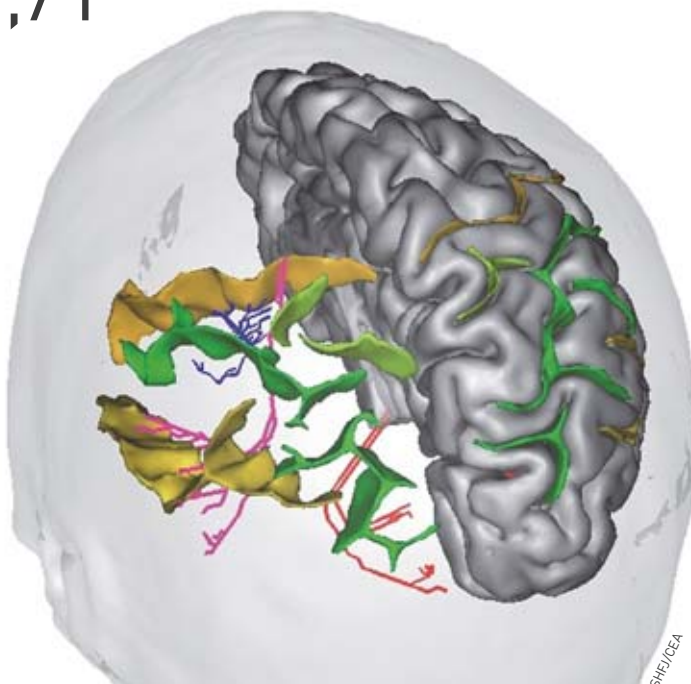
Avec le futur **imageur par résonance magnétique IRM** de 11,7 teslas, de nouvelles techniques d'exploration du cerveau pour l'homme pourront être mises en œuvre (Mémo C, **Les principales techniques d'imagerie médicale**, p. 36). Actuellement, celles-ci sont à l'étude chez le petit animal sur des systèmes à ultra-haut champ : 9,4 T à l'université de Minneapolis et 11,7 T au *National Institutes of Health*, États-Unis. Des prototypes encore plus puissants devraient permettre d'affiner la mise au point de ces nouvelles techniques (14 T à Lausanne, Suisse; 16,4 T à Tübingen, Allemagne et 17,65 T au centre CEA de Saclay pour **NeuroSpin**).

En combinant puissance, précision et nouvelles techniques, le système IRM à ultra-haut champ de 11,7 T pour l'homme promet d'atteindre une qualité d'images unique, offrant alors la possibilité de mieux comprendre et de mieux résoudre les énigmes du cerveau sain et malade. En jeu : un diagnostic personnalisé, plus précoce et plus précis.

L'imageur au cœur de défis technologiques

La conception et la réalisation de ce système constituent à la fois un défi instrumental et un saut technologique. Les composants de l'IRM représentent à eux seuls des challenges, impliquant la mise en œuvre de technologies de pointe : des **bobines** de gradient indispensables pour localiser le signal **RMN**, une antenne **radiofréquence** nécessaire pour exciter les **molécules** d'eau et recevoir en retour le signal RMN, un système électronique de contrôle/commande pour piloter les bobines de gradient et l'antenne radiofréquence, et enfin une console informatique capable d'orchestrer l'ensemble et de reconstruire des images tridimensionnelles du corps humain.

Cette future réalisation est le fruit d'une collaboration entre le CEA, **Siemens Medical Solutions** et **Alstom MSA**, où chacun a un rôle bien défini. En effet, il est prévu que le CEA coordonne le projet, apporte son expertise en recherche biomédicale ainsi que son savoir-faire pour la conception et le suivi des fabrications de l'aimant **supraconducteur** et de l'antenne radiofréquence (Mémo B, **Supraconductivité et supraconducteurs**, p. 16). Siemens Medical Solutions, spécialiste reconnu en **aimant** dédié à l'IRM, développera les bobines de gradient, l'électronique de contrôle/commande et la console informatique. Quant à Alstom MSA, il se chargera de produire le fil supraconducteur et de le bobiner en aimant pour l'IRM. L'aimant de



150 t arrivera de Belfort (site d'Alstom MSA), les bobines de gradient et autres éléments électroniques viendront d'Erlangen, en Bavière (site de Siemens Medical Solutions). L'assemblage et l'intégration seront effectués par une équipe mixte CEA-Siemens Medical Solutions à NeuroSpin.

Les équipes de NeuroSpin spécialisées en informatique et traitement d'images entreront ensuite en action. Durant deux à trois ans, ces dernières travailleront à la mise au point instrumentale du système, au développement d'outils de traitement d'images adaptés et à la mise en place de protocoles d'acquisition d'images. En dernier ressort viendra le lancement d'études de recherche cliniques dans les domaines des neurosciences **cognitives** et des pathologies cérébrales.

L'exploration du cerveau humain se heurte aujourd'hui aux limites techniques de l'imagerie biomédicale. La plate-forme NeuroSpin, qui mettra à la disposition de la communauté scientifique des instruments d'imagerie d'une puissance à ce jour inégalée, dont l'imageur par résonance magnétique de 11,7 T, devrait permettre aux scientifiques de repousser les limites de la connaissance.



Aimant 3 T de NeuroSpin dédié aux études cliniques et examens chez l'homme. L'IRM permet d'observer des organes profonds, tels que le cerveau, avec une sensibilité d'autant plus grande que le champ magnétique est intense. C'est pourquoi pour aller plus loin dans la compréhension du cerveau, le centre NeuroSpin sera doté en 2011 d'un imageur à résonance magnétique de 11,7 T destiné à l'homme.



A. Gombin/CEA

Le développement de protocoles de recherche de plus en plus ambitieux exige des appareils à plus haut champ. Le système IRM de 7 T de NeuroSpin, réservé aux études pré-cliniques et cliniques chez l'homme, est le premier en France et le quatrième en Europe de cette puissance. Il permet de visualiser de nouvelles structures grâce à une résolution spatiale plus fine. La réalisation de l'aimant de l'imageur IRM de 11,7 T, avec des caractéristiques à ce jour inégalées (ultra-haut champ magnétique dans un grand volume), constitue un véritable défi technologique.

Mettre au point des éléments innovants pour l'imageur

Développé par le Dapnia (aujourd'hui appelé Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers - Irfu) du centre CEA de Saclay, il va sans dire que l'aimant est le composant principal du système IRM (voir *L'aimant, pièce maîtresse de l'imageur*, p. 33). Sa fonction est de polariser les spins des protons des atomes d'hydrogène des molécules d'eau.

Les bobines de gradient

La réalisation d'un gradient de champ magnétique caractérise spatialement chaque élément du volume étudié. De la linéarité du gradient dépend la qualité des images. Siemens Medical Solutions, en collaboration avec le CEA, étudiera une architecture de bobines de gradient dont les caractéristiques devraient autoriser un gradient de champ magnétique approchant 0,1 T/m. Les contraintes mécaniques et le bruit acoustique généré constituent le principal défi à relever. Les bobines peuvent être parcourues par un courant de 600 A variant à une vitesse de quelques centaines de microsecondes dans un champ magnétique statique de 11,7 T. Très importantes, les forces créées produisent des vibrations et des chocs du support de la bobine contre le cryostat. Le bruit peut alors atteindre des niveaux sonores de l'ordre de 140 décibels (dB) sur des

systèmes à plus bas champ comme à 7 T. Sachant que le bruit augmente proportionnellement avec le champ statique, l'un des enjeux consiste à mettre en œuvre une technologie adaptée à 11,7 T pour limiter le bruit à 140 dB et respecter ainsi la réglementation en vigueur. Siemens Medical Solutions développera alors une bobine de conception nouvelle et la testera progressivement à 7 T et à 9,4 T, avant de l'installer dans l'IRM de 11,7 T.

L'électronique haute fréquence et le pilotage

Une architecture d'excitation et de réception des signaux, basée sur 8 canaux en transmission et 32 canaux en réception, sera mise au point et, au vu des quantités de données extrêmement importantes, l'architecture du système prévoit une extension à 128 canaux en transmission et 128 canaux en réception. Le système devra également suivre en temps réel l'absorption spécifique des radiofréquences, un paramètre de sécurité essentiel. Cet appareil unique demandera de fortes interactions entre les équipes de Siemens Medical Solutions et du CEA pour une intégration des différents composants du système. Des recherches conjointes s'effectueront sur les aspects de sécurité liés à la mise en œuvre d'un système de transmission à haute fréquence. Des logiciels seront étudiés dans l'optique de prévoir, modéliser la distribution des radiofréquences pendant l'expérience, et d'obtenir un asservissement en fonction de leur distribution.

Les bobines et les amplificateurs radiofréquences

Le CEA développera les équipements qui permettront l'excitation des protons (8 canaux en transmission, 32 canaux en réception) adaptés pour le 11,7 T, à une fréquence de 500 MHz, ce qui ne correspond à aucun équipement IRM existant. Les appareils seront basés soit sur des conceptions brevetées récemment par le CEA, soit sur une approche miniaturisée de microstrips⁽¹⁾. Un autre défi technologique pour le CEA

(1) Microstrip : ligne de transmission électrique constituée d'un ruban conducteur placé sur une face d'un matériau diélectrique - substance isolante capable d'emmagasiner de l'énergie électrostatique -, l'autre face formant un plan de masse.



Prototypes de bobines de gradient de champ magnétique pour l'IRM destinées à atténuer les problèmes de fatigue mécanique et les effets acoustiques. L'un des défis technologiques sera de limiter le bruit à 140 dB pour l'IRM de 11,7 T.

J.-J. Bigot/Irfu/CEA

consiste à développer des instruments qui ne conduisent pas à des "inhomogénéités" dans le champ magnétique de l'aimant principal, et limiter ainsi aux données réglementaires les possibles échauffements dans les tissus du sujet.

Les autres éléments

Les autres éléments de l'imageur à résonance magnétique et de son environnement seront basés sur des éléments commerciaux dans la mesure où ceux-ci sont disponibles, ou développés si nécessaire. Leur intégration sera assurée par Siemens Medical Solutions. Il s'agit en particulier de l'alimentation des bobines de *shim*, qui assurent la correction du champ magné-

tique de l'aimant principal, de la table d'examen amagnétique, des consoles, des ordinateurs de contrôle, de la gestion électrique et de celle des fluides (eau, air climatisé), des panneaux d'absorption sonore et de l'isolation acoustique.

Tous ces éléments devront être utilisés dans un environnement où les champs magnétiques seront très élevés et où les courants et les températures peuvent être extrêmes.

> Franck Lethimonnier

Institut d'imagerie biomédicale – NeuroSpin
Direction des sciences du vivant
CEA Centre de Saclay

L'aimant, pièce maîtresse de l'imageur

L'aimant du futur système d'imagerie par résonance magnétique IRM de 11,7 teslas est un projet ambitieux qui permettra de dépasser les frontières technologiques actuelles.

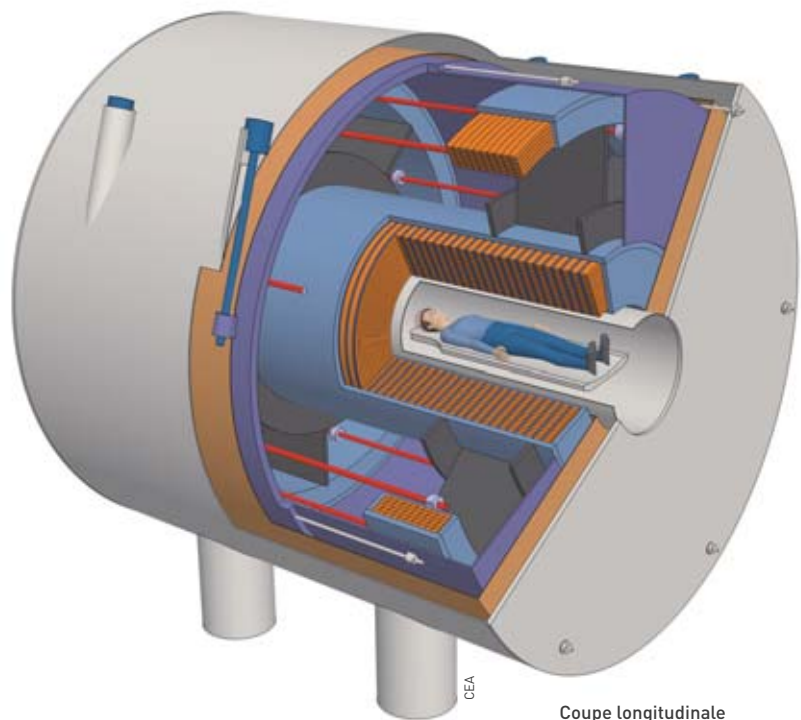
L'aimant de l'imageur par résonance magnétique IRM doit générer en son centre un champ magnétique homogène d'une intensité de 11,7 teslas, soit plus de 230 000 fois le champ magnétique terrestre, dans un volume de plusieurs m³ avec une ouverture utile de 90 cm de diamètre permettant le passage du corps entier d'un patient.

Tous ces défis accumulés font qu'aujourd'hui aucun industriel n'est en mesure de réaliser seul cet aimant. Aussi, son développement s'intègre dans le projet franco-allemand Iseult, où le CEA collabore avec des industriels majeurs du secteur, Guerbet, Siemens Medical Solutions et Alstom MSA. Le développement et la fabrication de l'aimant vont s'étaler sur quatre années avec une mise en service prévue à NeuroSpin en 2011.

Trois défis majeurs à relever

Il convient tout d'abord de relever trois défis technologiques liés à des impératifs propres à l'IRM : obtenir un champ magnétique homogène à quelques millièmes (ppm) de tesla autour du cerveau du patient, stabiliser le champ, le temps de l'examen, à quelques dizaines de milliardièmes de tesla et enfin, arriver à confiner le champ à l'intérieur de la salle d'examen.

Cela est obtenu grâce aux 65 tonnes des bobinages de l'aimant qui doivent être positionnés le plus précisément possible autour du cerveau (à quelques dixièmes de millimètre). Le bobinage est réalisé à partir de plusieurs milliers de kilomètres de fils en niobium-titane (NbTi) de l'ordre d'un millimètre de diamètre. Ce matériau est supraconducteur et n'offre aucune résistance électrique au passage du courant (Mémo B, *Supraconductivité et supraconducteurs*, p. 16). À titre de comparaison, il est possible de faire passer dans ce brin 400 fois plus de courant que dans un fil classique en cuivre de la même taille. Ce supraconducteur doit être maintenu à de très basses températures (1,8 K, soit - 271 °C). Les bobines sont baignées dans plusieurs milliers de litres



d'hélium superfluide protégés de l'extérieur par une série d'enceintes, telle une gigantesque bouteille thermos. Le confinement du champ magnétique est réalisé grâce à un bobinage extérieur qui génère un contre-champ, lequel annule celui du bobinage principal à l'extérieur de l'aimant. Dans un système classique, il faudrait plusieurs milliers de tonnes de blindage en fer pour obtenir le même effet.

Les spécificités de l'aimant

L'aimant de 11,7 T corps entier à blindage actif fonctionnera donc à un niveau de champ homogène de 11,7 T dans une ouverture utile de 90 cm avec les caractéristiques suivantes :

- une homogénéité de champ meilleure que 0,1 ppm crête à crête, dans un volume de 10 cm de diamètre, centré sur le cerveau à étudier ;

Coupe longitudinale de l'aimant de 11,7 T et de l'assemblage du cryostat. La bobine principale est située autour du patient, avec des bobines de compensation positionnées à l'extérieur. Les bobines sont reliées mécaniquement par des plaques et des tirants à l'intérieur de l'enceinte hélium. Six tirants supportent la masse froide et sont attachés à travers la paroi thermique de 60 K à l'enceinte à vide.

- une *stabilité temporelle* égale ou meilleure que 0,05 ppm/h pour la dérive totale et une stabilité à court terme sur 10 minutes de 10^{-4} ppm pour permettre l'acquisition d'une image ou d'un spectre IRM. Dans la proposition actuelle, une alimentation électrique hautement stabilisée sera connectée en permanence à l'aimant. La stabilité demandée est au moins d'un ordre de grandeur meilleure que celle d'alimentations conventionnelles existantes;
- un *aimant blindé activement* grâce à une bobine de compensation. La distance maximale de la ligne du **champ de fuite** de l'ordre de 5 **gauss** est de 9,6 m du centre de l'aimant dans la direction axiale et de 7,5 m radialement;
- une technologie d'un bobinage cryostable dite en *double-galette*;
- un refroidissement et une cryostabilité de l'aimant assurés grâce à un bain d'hélium à 1,8 K pressurisé dans une enceinte hélium commune aux deux bobinages;
- un choix de *conducteur en NbTi* pour des raisons économiques, et qui sera doté de paramètres critiques permettant de fonctionner à 1 500 A.

Le bobinage

La réalisation de la bobine principale est basée sur un conducteur rectangulaire fait de un ou plusieurs brins de NbTi. Plusieurs options sont encore à l'étude,

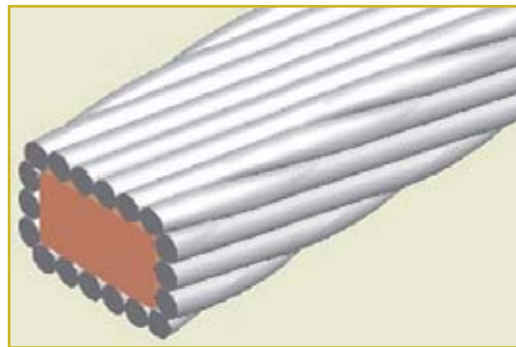


Figure 1. Vue schématique du conducteur de la bobine principale dans l'option câble autour d'une âme en cuivre (9,2 mm x 4,6 mm).

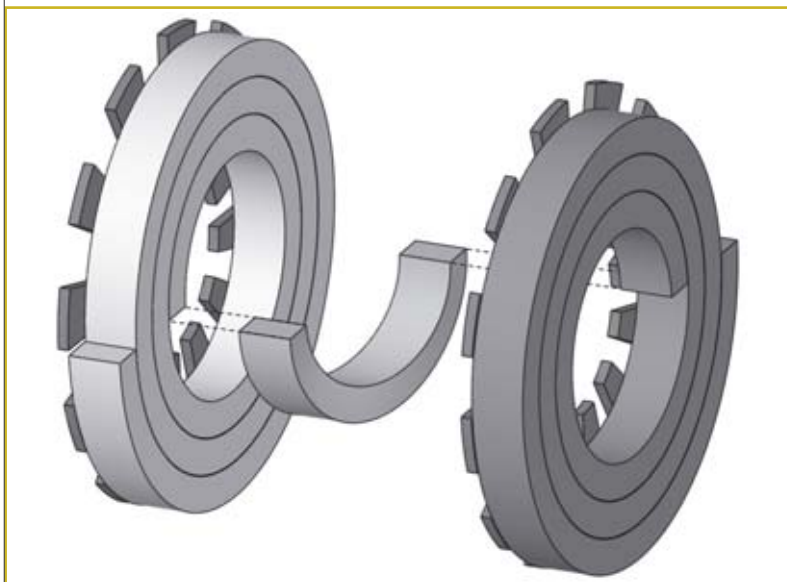


Figure 2. Vue schématique d'une double-galette avec une transition courbe au milieu (les dimensions ne sont pas à l'échelle).

du monolithe pur en NbTi/Cu à un **composite** de brins de NbTi/Cu assemblés autour d'une âme en cuivre (figure 1) ou dans une goulotte en cuivre. Le conducteur aura approximativement une dimension de 9,2 mm de large sur 4,6 mm d'épaisseur, soit quatre fois celle des conducteurs habituellement utilisés dans les systèmes d'IRM commerciaux, avec un rapport de section de cuivre sur celle de supraconducteur de 4,3 pour 1. Le courant est de 1 498 A pour une **densité de courant** moyenne dans le bobinage de 28,9 A/mm².

Comme le conducteur doit être directement mouillé par l'hélium pour des raisons de cryostabilité, la bobine principale est construite à partir d'un arrangement de modules de bobines en double-galette, espacés par des cales de fibres de verre-époxy (figure 2). L'homogénéité de champ est obtenue avec un arrangement de modules de doubles-galettes en blocs ajustés avec espacements. Cet arrangement en bloc est communément utilisé dans les aimants d'IRM, mais jusqu'à présent, jamais à partir de bobinages en double-galette.

Les principaux avantages liés à l'emploi de ces doubles-galettes sont la modularité de l'assemblage et la légèreté des éléments, en comparaison avec un bobinage classique de **solénoïde** en couches. Le principal désavantage est rattaché à la transition du conducteur d'une galette à l'autre au rayon intérieur (figure 2). La trajectoire non symétrique du courant peut générer des termes de champs hors axes si aucune précaution n'est prise.

La structure de la bobine en double-galette a été **modélisée** et optimisée pour obtenir une homogénéité de champ et une réduction du champ de fuite externe. La bobine de compensation, qui permet cette réduction, est connectée en série avec la bobine principale et est située sur le diamètre extérieur de l'appareil. Elle est réalisée à partir d'un fil supraconducteur de NbTi positionné dans une goulotte en cuivre puis bobiné et imprégné sous vide par une résine époxy. Le champ maximal sur ce bobinage est de 4,4 T.

La structure mécanique, le cryostat et la cryogénie

L'aimant est entouré d'un seul écran thermique refroidi à la température de 60 K à l'intérieur d'une enceinte à vide. Cette **masse froide** d'environ 80 tonnes est supportée à l'intérieur d'une enceinte à vide par six tirants verticaux. Des tirants axiaux limitent le déplacement latéral de l'aimant. Les dimensions externes de l'enceinte à vide sont approximativement de 4,6 m de diamètre et de 4,9 m de longueur.

La bobine principale et la bobine de compensation sont refroidies dans un bain d'hélium superfluide à 1,8 K pressurisé à la pression ambiante. Les équipements de production de cet hélium superfluide seront installés dans un satellite cryogénique séparé et situé à proximité de l'aimant. Ce satellite comprendra les deux amenées de courant, l'échangeur 1,8 K et toutes les vannes de sécurité utiles en cas de transition de l'aimant de l'état supraconducteur à l'état normal (*quench*).

Les lignes d'alimentations électrique et en hélium seront installées dans une ligne cryogénique de plusieurs mètres de long, qui reliera l'aimant aux autres



F. Vigouroux/CEA

Préparation de l'ancien aimant de 8 T du LCMI, bobiné en double-galette, pour la station d'essais SEHT.

équipements de production de courant (alimentation électrique, résistances de décharge) et d'hélium (liquéfacteur de 100 L/h, compresseurs...) situés au sous-sol du bâtiment NeuroSpin.

La protection

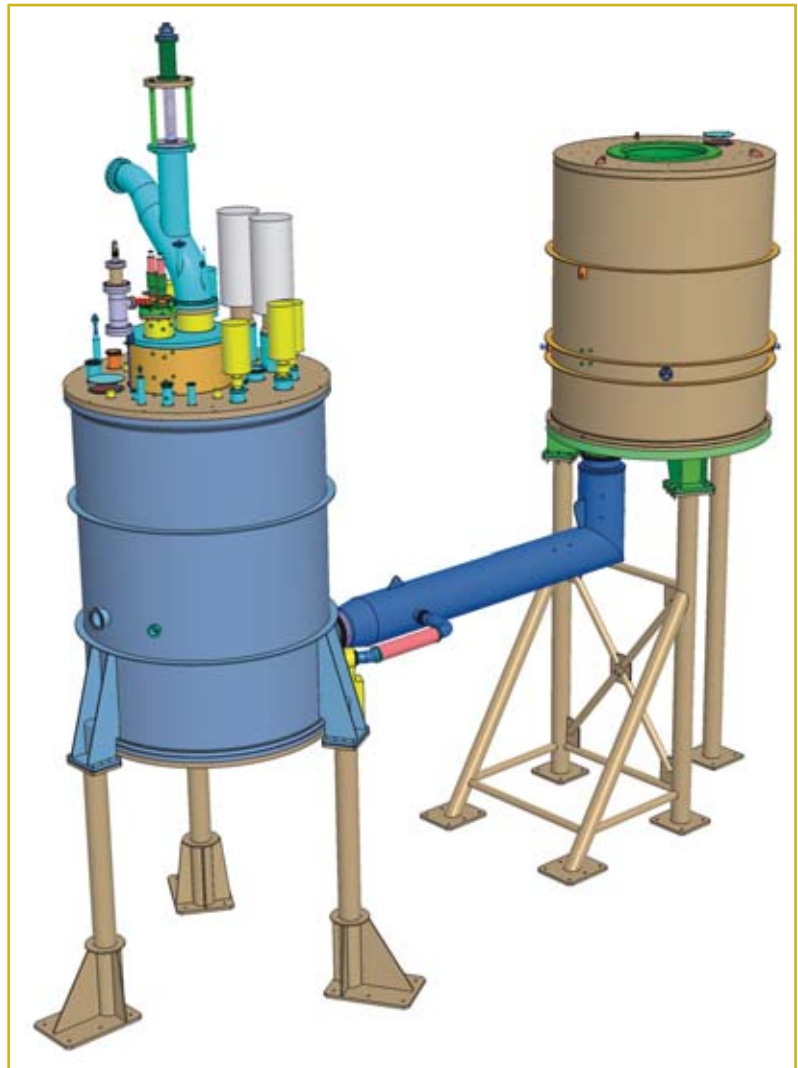
La protection de l'aimant a été calculée en considérant que toute l'énergie magnétique stockée est déchargée dans une résistance externe de 2,67 ohms (Ω) sous une tension maximale de +/- 2 000 V. Le volume de cuivre présent dans l'aimant a été déterminé pour limiter la température maximale de l'aimant à 150 K.

Concevoir des modèles et des prototypes spécifiques

L'aimant comporte un certain nombre de caractéristiques qui le distinguent des aimants d'IRM conventionnels. Aussi, les nouvelles solutions proposées réclament un plan de développement adapté comprenant entre autres la réalisation de modèles et de prototypes spécifiques.

Par exemple, pour démontrer la possibilité d'obtenir un champ homogène meilleur que 1 ppm en utilisant la technologie des doubles-galettes, il a fallu concevoir un modèle comprenant 24 doubles-galettes (1,5 T, avec un diamètre interne de 480 mm et un diamètre externe de 805 mm) qui sera testé à froid et dont la qualité de champ sera mesurée avec des sondes RMN.

Par ailleurs, pour étudier le comportement d'un



CEA

Figure 3. Station de tests SEHT et expérience. L'aimant de 8 T, situé à droite, est hébergé dans un cryostat relié à un satellite de 1,8 K (sur la gauche) par une ligne cryogénique. Cette expérience permet d'étudier les conditions de réalisation et de fonctionnement considérées pour l'aimant final.

aimant à haut champ réalisé avec des bobines en double-galette cryostables et un conducteur de 1 500 A en NbTi dans l'hélium superfluide, un ancien aimant de 8 T utilisé au **Laboratoire des champs magnétiques intenses (LCMI)** de Grenoble a été remis en route. Cet aimant bobiné en double-galette a été remplacé à l'intérieur d'un nouveau **cryostat**. Ce prototype appelé SEHT (Station d'Essais Huit Teslas) est relié à un satellite cryogénique qui fournit à l'aimant de l'hélium superfluide à 1,8 K au travers d'une ligne cryogénique, incluant aussi les lignes d'alimentation électrique (figure 3).

Cette expérience donnera également l'opportunité d'étudier les composants et les procédures de fabrication de l'aimant ainsi que les conditions de fonctionnement prévues pour l'aimant final, tant sur le plan **électromagnétique**, thermique que thermohydraulique. De plus, elle permettra de valider les développements effectués sur la cryogénie à 1,8 K, le système d'alimentation électrique et les systèmes de contrôle et de protection de l'aimant. Le prototype SEHT devrait être opérationnel en avril 2008.

> Pierre Védrine

Institut de recherches
sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
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-

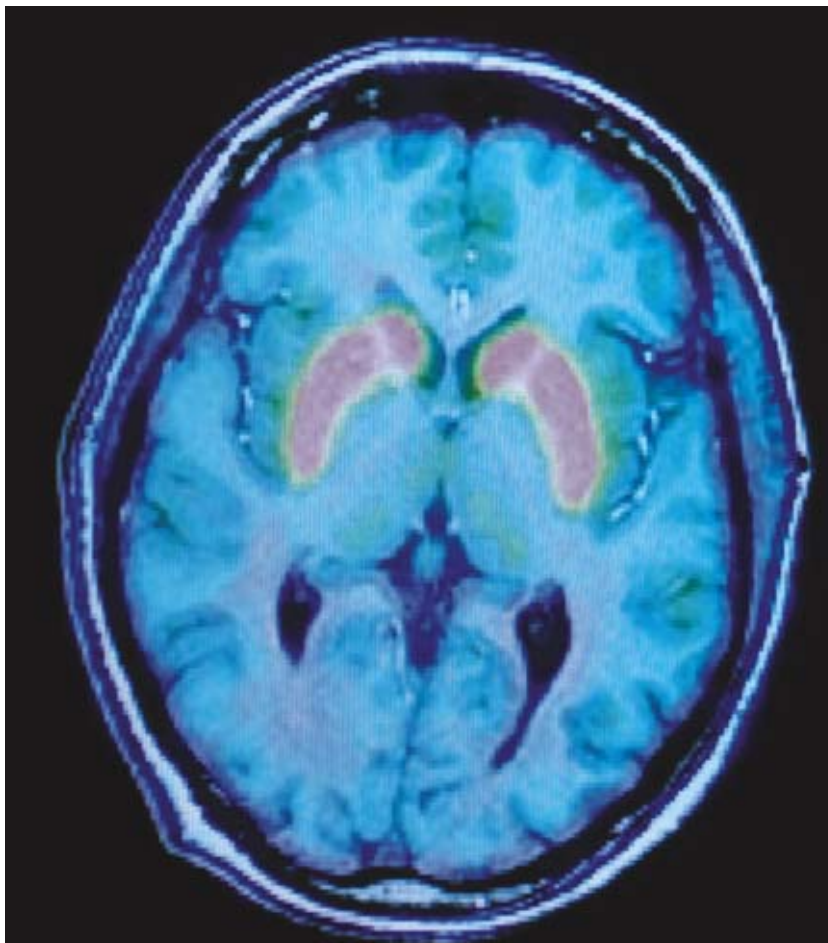
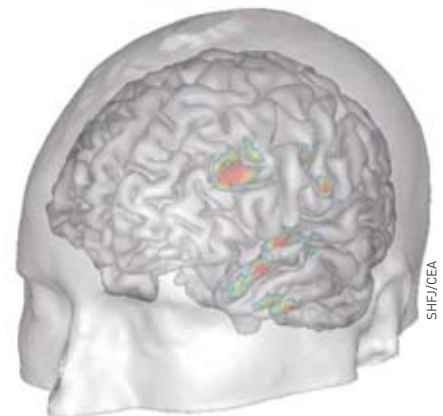


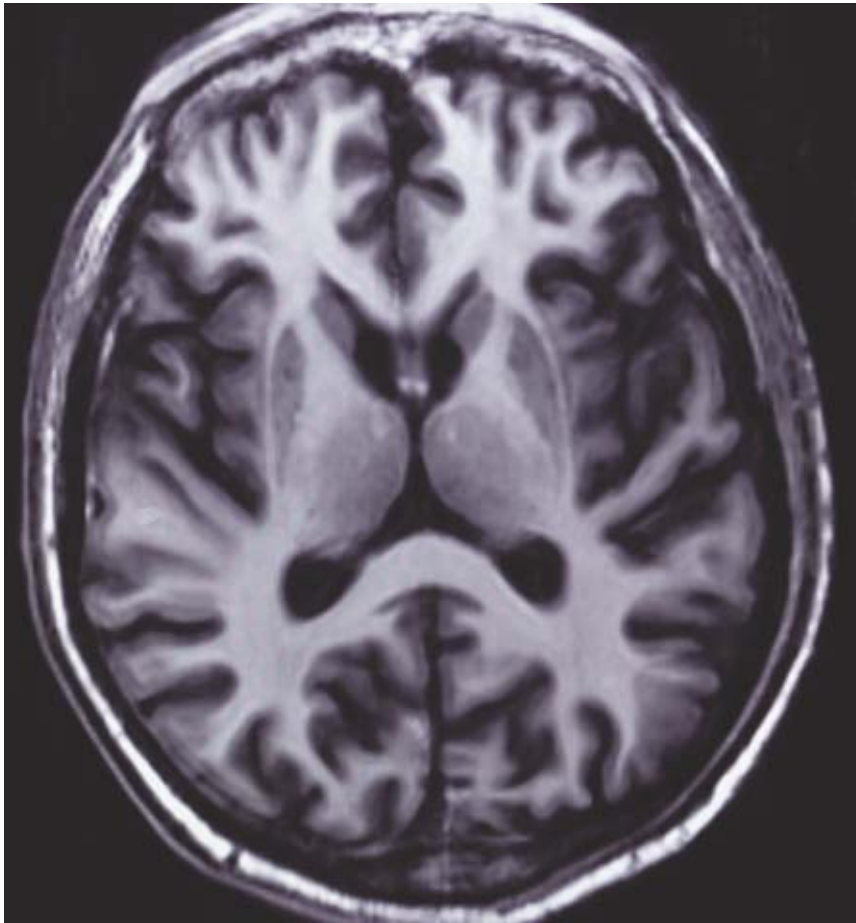
Image en TEP. Les positons émis par les traceurs radioactifs préalablement injectés au patient sont détectés par la caméra TEP, ce qui permet, après analyse informatique, de reconstituer une image en 3D de l'organe étudié.



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 SHF 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⁽¹⁾), 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 λ_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.

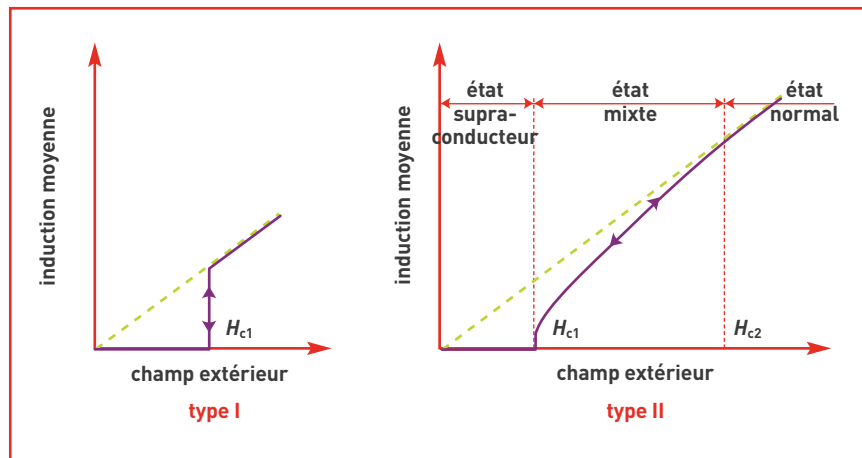


Figure 1. Induction moyenne dans des supraconducteurs de type I et de type II en fonction du champ extérieur.

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 ξ et à la notion de pro-

fondeur de pénétration λ_L , qui caractérisent l'interface entre une région normale et une région supraconductrice. ξ représente la variation spatiale de l'état supraconducteur (densité d'électrons supraconducteurs) et λ_L la longueur de pénétration de London du champ magnétique. Le rapport de ces deux longueurs caractéristiques, appelé **paramètre de Ginzburg-Landau** et noté κ ($\kappa = \lambda_L/\xi$) 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 λ_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 κ . Dans le cas des supraconducteurs de type II, l'état mixte résulte

Suite page 18

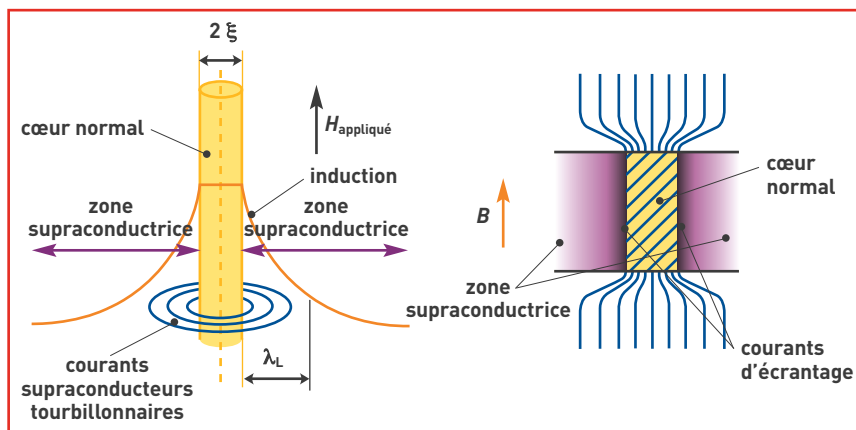
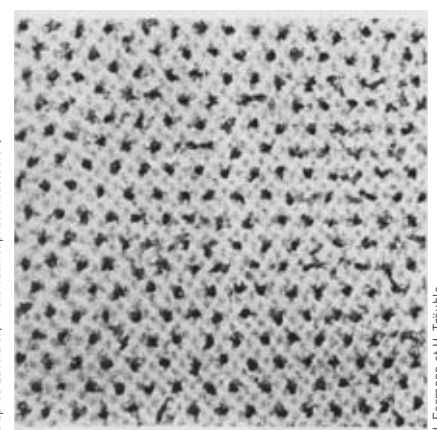


Figure 2. Schéma d'un vortex mettant en évidence la longueur de cohérence et la profondeur de pénétration.



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

matériau		ξ (μm) 0 K	λ_L (μm) 0 K	κ	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 ₃ Sn	0,003 6	0,065	18	18	0,017	25,5
	YBaCuO	plan	0,003	plan 0,8	≈ 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, μ_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 Nb₃Sn** (18 K). La mise en œuvre de leur supraconductivité nécessite une réfrigération à la température de l'hélium

liquide [4,2 K]⁽²⁾, 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/mm²). 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).



LEG Grenoble

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⁽³⁾. 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.

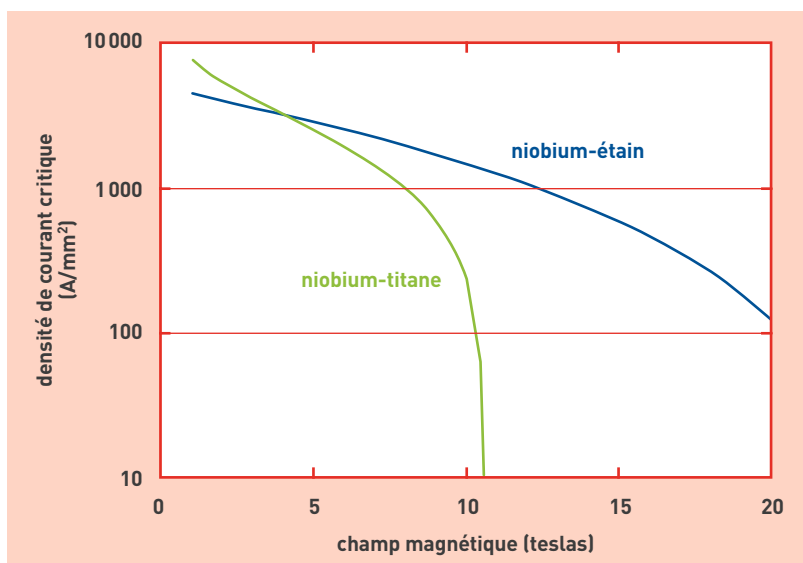


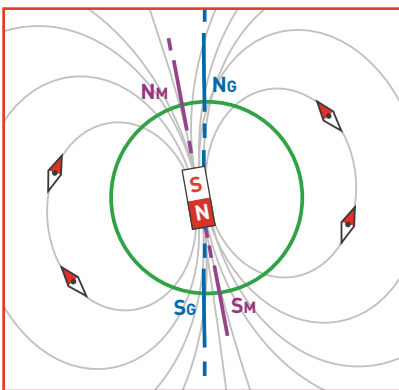
Figure 3. Densités de courant critique caractéristiques en fonction du champ magnétique à 4,2 K pour les deux matériaux supraconducteurs les plus utilisés, notamment pour la fabrication d'aimants supraconducteurs.

(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°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*

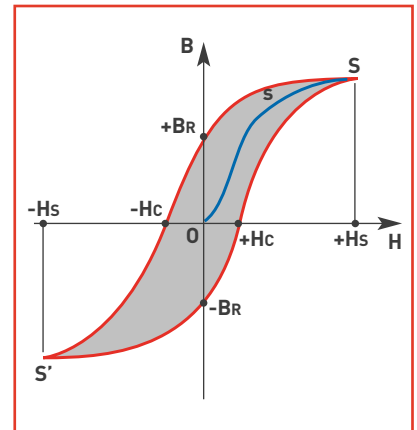


Figure E2. L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type OS sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend 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,

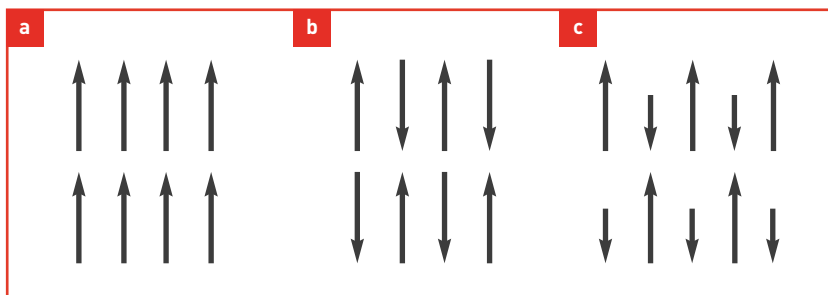


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



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.

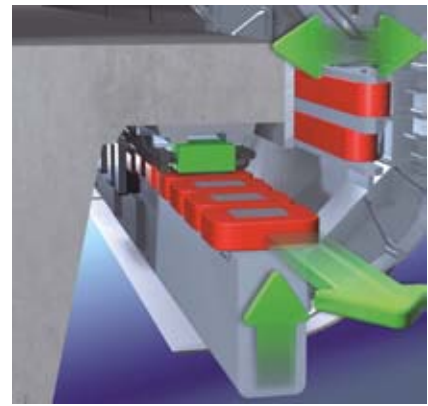
3. Les matériaux **diamagnétiques** présen-

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.