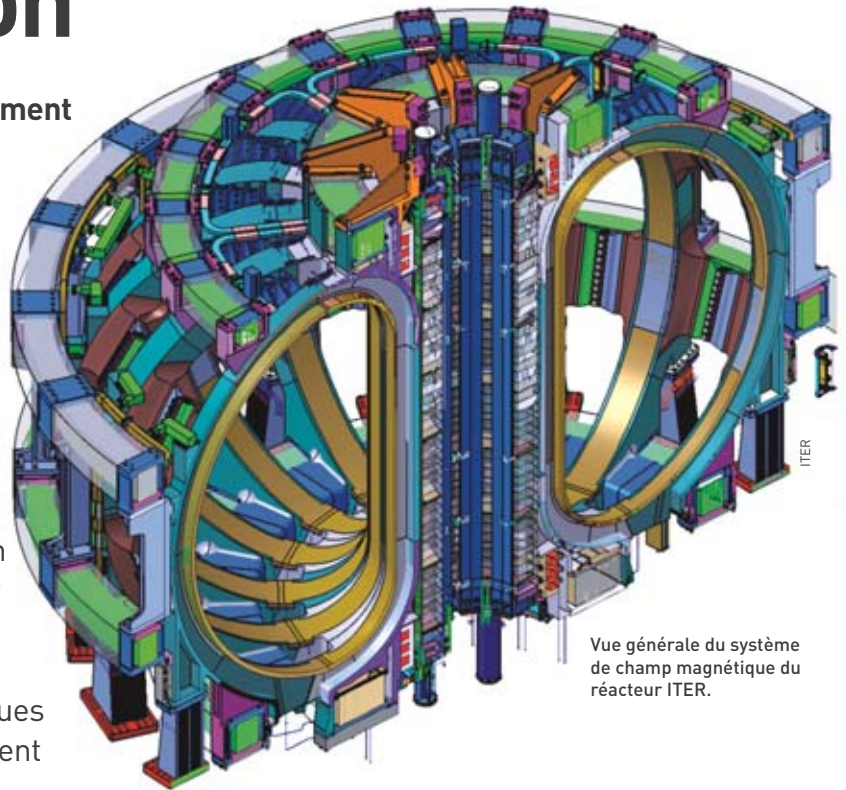


Les aimants supraconducteurs pour la fusion

Démontrer que la fusion par confinement magnétique pourrait devenir une source d'énergie dans la seconde moitié du siècle est la mission dévolue à ITER. Ce tokamak, qui commencera à fonctionner en 2016 sur le site de Cadarache (Bouches-du-Rhône), constituera une étape essentielle vers la mise au point d'un réacteur de fusion électrogène. De par son savoir-faire acquis avec Tore Supra au sein de son association avec Euratom, le CEA s'est fortement impliqué dans la conception des trois grands systèmes supraconducteurs qui généreront les champs magnétiques intenses indispensables au confinement et à la stabilisation du plasma.



Vue générale du système de champ magnétique du réacteur ITER.

La fusion magnétique nécessite la présence de champs magnétiques intenses pour confiner les plasmas thermonucléaires. La production de ces champs magnétiques dans la grande chambre à vide (837 m³) du réacteur expérimental ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), en cours de construction sur le site de Cadarache

(Bouches-du-Rhône), est en elle-même un défi technologique. Le système de champ magnétique d'ITER comprend trois grands systèmes supraconducteurs : le système de champ magnétique toroïdal (TF), le système de champ magnétique poloïdal (PF), le solénoïde central (CS) ; Mémo B, *Supraconductivité et supraconducteurs*, p. 16. Il constitue en quelque sorte l'épine dorsale du tokamak (figure 1).

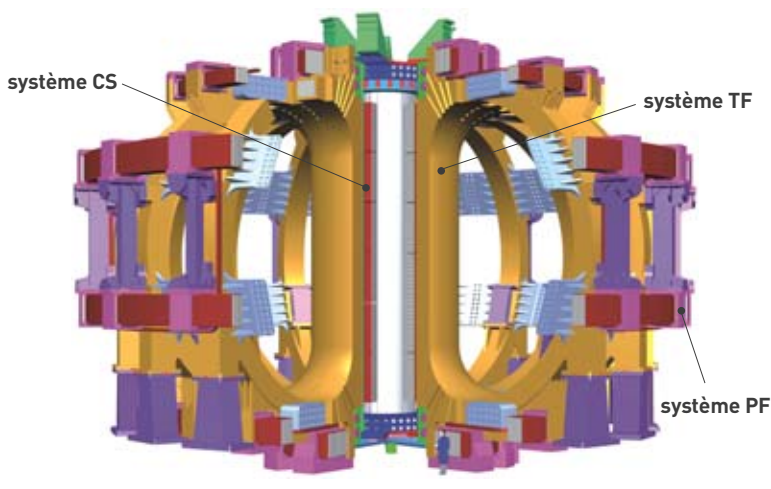


Figure 1. Les trois grands systèmes supraconducteurs de champ magnétique du réacteur expérimental ITER. Les bobines de champ toroïdal (système TF), au nombre de dix-huit, enroulées autour du tore assurent le confinement du plasma. Le solénoïde central (système CS) crée un courant très intense qui, en circulant dans le plasma, va le chauffer et générer un autre champ magnétique qui contribue à son confinement. Les bobines de champ poloïdal (système PF), au nombre de six, encerclant le tore, servent à stabiliser le plasma.

La supraconductivité au service de la fusion

Jusqu'au début des années 1980, toutes les machines à confinement magnétique ont utilisé des aimants résistifs, généralement à base de cuivre dopé à l'argent pour améliorer les propriétés mécaniques. La faible taille des machines et surtout leur nature pulsée rendaient alors possible cette solution, laquelle a été poussée le plus loin avec le tokamak européen JET (*Joint European Torus*). Dans le cas du JET, la puissance totale nécessaire pour alimenter les aimants, supérieure à 1 GW, ne peut encore être délivrée à la machine qu'à l'aide de générateurs à volant d'inertie, en raison de la faible durée des décharges⁽¹⁾ plasma (10 à 30 secondes). La solution faisant appel à des aimants résistifs n'est évidemment pas extrapolable pour le réacteur de fonctionnement continu par essence (tableau).

Ces raisons ont incité l'Europe à inclure dans son programme de fusion une première machine à aimants

(1) Décharge (plasma) : désigne la présence d'un plasma dans l'enceinte de confinement.

machine (temps de décharge)	grand rayon (m)	volume du plasma (m ³)	champ magnétique dans l'axe du plasma (T)	puissance de fusion (MW)	puissance électrique (MW)
Tore Supra (1000 s)	2,4	24	4,5	0	≈ 150 (machine à aimant supraconducteur)
JET Upgrade (10 s)	2,96	100	4	≈ 20	≈ 500 (machine à aimant en cuivre)
ITER (500 s)	6,2	837	5,3	≈ 400	≈ 800 (machine à aimant supraconducteur)

Tableau.

Puissances électriques nécessaires (uniquement pour le système de champ toroïdal) de quelques projets de fusion par confinement magnétique dans le cas d'aimants en cuivre.

supraconducteurs: le tokamak Tore Supra du centre CEA de Cadarache de grand rayon plasma R égal à 2,4 m. Le système TF de Tore Supra comporte 40 tonnes de matériaux supraconducteurs (figure 2). Celui-ci a produit ses premiers plasmas en 1988. Il avait été précédé dans cette voie en 1986 par le tokamak japonais de très petite taille TRIAM ($R = 0,8$ m). Le bon fonctionnement du système supraconducteur de Tore Supra durant toutes ces années a ouvert la voie à cette technologie indispensable à la fusion.

Aujourd'hui, les projets de grande ampleur en matière de fusion par confinement magnétique ne font plus intervenir des aimants résistifs, et tous emploient des bobines supraconducteurs. En 1998, le torsatron⁽²⁾ japonais LHD, d'une taille similaire à Tore Supra, a produit ses premiers plasmas, suivi par le tokamak chinois EAST en 2006. Plusieurs machines sont actuellement en construction dans le monde. Il convient de citer les plus significatives: le stellarator⁽²⁾ W7-X (Allemagne) et les trois tokamaks KSTAR (Corée du Sud), SST1 (Inde) et JT-60SA (Japon). Enfin, ITER qui reste une machine pulsée est un tokamak entièrement supraconducteur. Indépendamment des problèmes de rendement et de consommation électrique, la puissance de 2 GW pendant les 500 secondes de décharge plasma que nécessiterait une machine résistive ne peut être tirée de manière raisonnable d'aucun réseau électrique au monde.

Dans le cadre de DEMO, un réacteur de fusion électrogène délivrant une puissance électrique de 1000 MW et dont la construction pourrait commencer dans 20 ans, la puissance électrique nécessaire à la cryogénie des aimants supraconducteurs peut être évaluée dans une fourchette de 20 à 30 MW.

L'histoire de la fusion et celle de la supraconductivité appliquée ne se sont croisées que récemment. La supraconductivité appliquée était jusqu'aux années 1980 très liée à l'imagerie médicale et à la physique des particules qui l'ont fait beaucoup progresser. Les premières machines supraconductrices de la fusion ont pu s'appuyer sur ces premiers acquis et notamment l'alliage niobium-titane (NbTi) qui a fait ses preuves. Mais la fusion, par la taille des machines, la valeur élevée des champs magnétiques et les aspects liés aux champs variables qui lui sont spécifiques, apporte des exigences nouvelles à la supraconductivité appliquée.

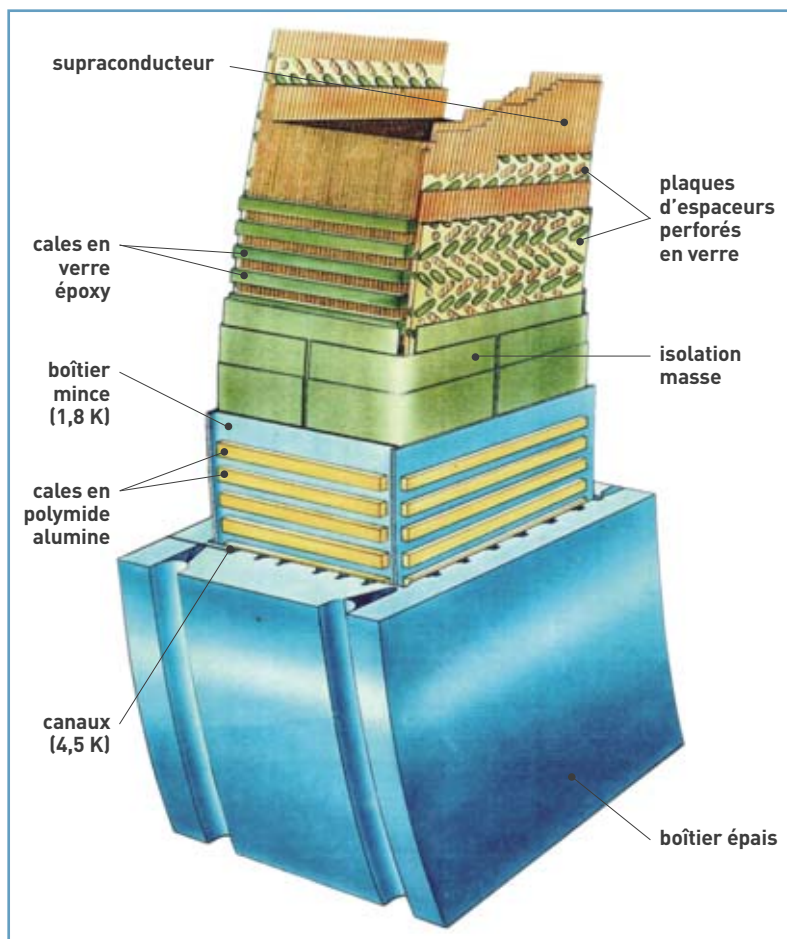


Figure 2.

Coupe d'une bobine supraconductrice du système TF de Tore Supra, montrant les 26 doubles-galettes prises dans leur double système de boîtiers.

Les programmes de développement rattachés à ITER ces dix dernières années ont vu l'industrialisation d'un nouveau matériau supraconducteur le niobium-étain (Nb₃Sn). La réalisation des deux bobines modèles supraconductrices du programme ITER et leurs essais en Europe et au Japon (2000-2002) ont permis de valider les choix pour les bobines d'ITER. Le système magnétique d'ITER et son réfrigérateur associé représentent à eux seuls près d'un tiers (31 %) du coût de la machine, c'est dire l'importance des enjeux liés à ces développements.

Les câbles supraconducteurs pour ITER

Le concept de câble en conduit supraconducteur (CICC) peut être vu comme la transposition à la cryoélectricité des technologies utilisées dans l'électrotechnique des forts courants, et notamment des

(2) Torsatron et stellarator: le torsatron est un système de confinement magnétique dans lequel les lignes de champ qui confinent le plasma, tant toroïdales que poloïdales, sont générées par des aimants enroulés en hélice situés autour de la chambre à vide. C'est une version simplifiée du stellarator qui, lui, a deux systèmes d'aimants.

conducteurs refroidis à l'**hydrogène** et à l'eau des rotors et des stators des grands turbo-alternateurs des centrales électriques.

En effet, les systèmes magnétiques d'ITER, et en particulier le système TF, dépassent en énergie stockée tous les systèmes supraconducteurs jamais réalisés. La grande taille de ces systèmes magnétiques rend donc incontournable, pour limiter les **inductances** et donc les tensions électriques en exploitation, l'utilisation de forts courants (40 à 70 kA). Mais les rapides variations en champ et en courant (systèmes PF et CS) sont également une spécificité des systèmes magnétiques d'ITER. Les bobines d'imagerie médicale, par exemple, fonctionnent à courant constant. Les tensions électriques restent donc très fortes (5 à 10 kV par rapport à la masse). Le câble est pris dans une gaine d'acier qui permet de supporter mécaniquement les grandes contraintes électromagnétiques au plus près, sans les laisser s'accumuler dans le matériau supraconducteur. La gaine est elle-même isolée à l'aide d'un matériau multicouche fait de verre et de Kapton⁽³⁾. L'**hélium** qui circule dans le câble permet de limiter l'échauffement dû aux pertes associées au rayonnement **neutronique** résiduel et aux variations de champ et de courant.

De plus, le conducteur des bobines d'ITER doit pouvoir faire face, sans perdre l'état supraconducteur, à un événement majeur qui est la disruption⁽⁴⁾ du plasma de 15 MA. Cette disruption provoque une variation rapide de champ sur les conducteurs. Cette contrainte d'exploitation ne peut être atteinte qu'avec la structure typique du CICC : une fine subdivision en brins mouillés par de l'hélium à haute chaleur spécifique. Ce concept, inventé en

1975, apporte au CICC une grande stabilité par rapport aux perturbations thermiques qui caractérisent l'environnement des systèmes magnétiques des tokamaks.

Enfin, la forme du conducteur confère des caractéristiques spéciales au **quench** de la bobine, c'est-à-dire la perte rapide de l'état supraconducteur, un événement qui ne devrait jamais arriver mais dont l'éventualité ne peut être complètement écartée. Contrairement aux bobines en bain, la propagation du **quench** est canalisée dans le conduit et provoque une montée de pression. La **modélisation** et la détection du **quench** dans les bobines de tokamak, afin de les protéger par extraction de l'énergie, posent des problèmes spécifiques. Il n'existe encore que peu d'expérience sur le comportement des bobines de tokamak en cas de **quench**.

Des progrès substantiels ont à présent été réalisés dans le concept du conducteur, même si celui-ci pose encore quelques problèmes électromécaniques délicats dans le cas du Nb₃Sn. Le CICC doit répondre aux spécifications de la fusion et en même temps être facile à industrialiser.

Dans un CICC de type ITER, environ un millier de brins (figure 3) sont torsadés dans un câble comprenant cinq étages et insérés dans la gaine d'acier qui assure l'étanchéité. Deux conducteurs typiques, les conducteurs de deux échantillons représentatifs des bobines modèles d'ITER, sont présentés à la figure 4. Les CICC de ces bobines modèles affichent des caractéristiques communes. Six pétales, composés de brins torsadés, sont câblés autour d'une hélice métallique centrale d'environ 10 mm de diamètre interne et 1 mm d'épaisseur. Dans ce concept de CICC à deux canaux hydrauliques, inventé par le CEA, l'hélium peut circuler en parallèle dans la zone centrale et dans la zone des brins, avec une perte de charge limitée. Le taux de vide d'environ 30 % est un compromis entre plusieurs aspects du dimensionnement (hydraulique, électrique et mécanique). La forme circulaire du câble offre un avantage décisif en ce qui concerne la fabrication et les performances. Elle autorise des fabrications séparées de la gaine et du câble, et une introduction du

(3) Kapton : film de **polymère** qui peut rester stable dans une gamme étendue de température, de -269 °C à 400 °C.

(4) Disruption (d'un plasma) : désigne la perte complète du confinement du plasma. Une disruption peut avoir de nombreuses conséquences. Toute diminution brutale de courant et/ou de champ magnétique induit des courants et/ou des champs magnétiques miroirs dans les composants entourant la machine. Ces composants sont du coup soumis à des efforts qui peuvent être considérables.

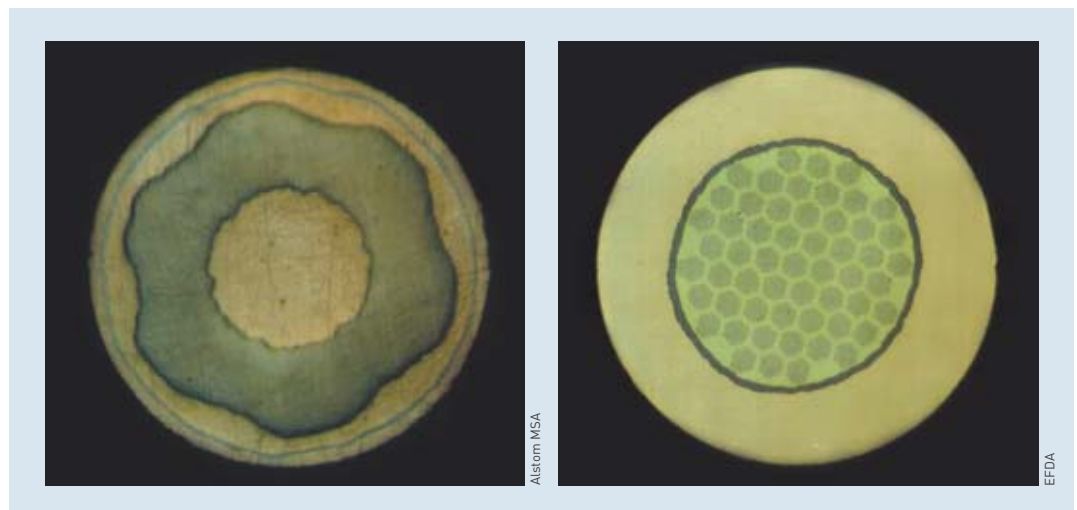


Figure 3. À gauche, brin réalisé par **Alstom MSA** en NbTi et à droite, brin fabriqué par **EAS** en Nb₃Sn, tous deux de 0,81 mm de diamètre, pour les CICC développés dans le cadre d'ITER.



Figure 4. À gauche, le CICC de la bobine modèle du solénoïde central d'ITER (51 mm x 51 mm, 40 kA); à droite, vue explosée du CICC de la bobine modèle du système TF d'ITER (diamètre 40,7 mm, 80 kA).

câble dans la gaine avec un jeu faible de l'ordre du millimètre. En régime variable, la distribution de courant dans un câble supraconducteur est pilotée par les inductances des brins. La forme circulaire permet autant que possible une certaine égalité des inductances, mais celle-ci n'est pas parfaite.

Quel avenir pour les aimants supraconducteurs ?

La supraconductivité appliquée aux aimants est marquée en ce moment par l'immense effort lié à la réalisation du LHC au **Cern** (voir *Les aimants supraconducteurs au service du LHC*, p. 4), au projet ITER au centre CEA de Cadarache et au projet **NeuroSpin** au centre CEA de Saclay (voir *L'imagerie par résonance magnétique à ultra-haut champ*, p. 30).

Ces projets font tous appel à de très basses températures, dans la gamme de 1,8 à 5 **K**. Les **supraconducteurs à haute température critique** laissaient espérer, lors de leur découverte, l'émergence d'une cryogénie à la température de l'azote liquide (77 K) dans les applications liées au réseau électrique. Dans la pratique, en dépit de la fabrication de prototypes intéressants dans le domaine des câbles de puissance et des moteurs, ils peuvent actuellement concurrencer les conducteurs en cuivre seulement sur des marchés particuliers. De ce point de vue, les chercheurs en restent encore à la réalisation de démonstrateurs.

Par contre, la supraconductivité appliquée peut énormément apporter dans le domaine de la fabrication d'aimants à haut champ magnétique. Ces aimants constituent les composants critiques d'instruments utilisés dans de nombreux domaines de recherche, comme la physique nucléaire, la physique des particules, la physique de la matière condensée, les sciences du vivant, la fusion par confinement magnétique... Tous ces domaines ont en commun le

développement de systèmes magnétiques performants, caractérisés par des champs élevés et des fortes **densités de courant**. L'importance du domaine est d'ailleurs prouvée par le nombre de prix Nobel décernés ces vingt dernières années. La **spectroscopie RMN**, en particulier, met l'accent sur la nécessité de disposer de champs magnétiques intenses, stables et uniformes au-dessus de 20 **T**. Dans ce cas, les matériaux supraconducteurs à haute température critique, comme le Bi2212 ou l'YBaCuO utilisés à basse température, peuvent aider à atteindre cet objectif en raison de leur **champ critique** extrêmement élevé. Cet enjeu suscite des développements technologiques intéressants et les premiers prototypes font maintenant leur apparition.

Ainsi, les prochaines applications des aimants supraconducteurs restent probablement encore à découvrir. Elles émergeront vraisemblablement, comme pour l'imagerie médicale, au contact des progrès apparaissant dans d'autres disciplines. L'organisation de la recherche doit prendre en compte cet aspect déterminant.

> **Jean-Luc Duchateau**

Institut de recherche sur la fusion
par confinement magnétique

Direction des sciences de la matière

Association Euratom-CEA Centre de Cadarache

POUR EN SAVOIR PLUS

A. C. ROSE-INNES and E. H. RHODERICK, *Introduction to superconductivity*, Pergamon Press, 1977.

P. TIXADOR, *Matériaux supraconducteurs*, Hermes-Lavoisier, Paris, 2003.

J.-L. DUCHATEAU and M. TENA, "Towards steady state in fusion machines: the experience of Tore Supra superconducting magnet system", *Fusion Engineering and Design*, 81, p. 2297-2304, 2006.

N. MITCHELL, "Summary assessment and implications of the ITER model coil test results", *Fusion Engineering and Design*, 66-68, p. 971-993, 2003.

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⁽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.

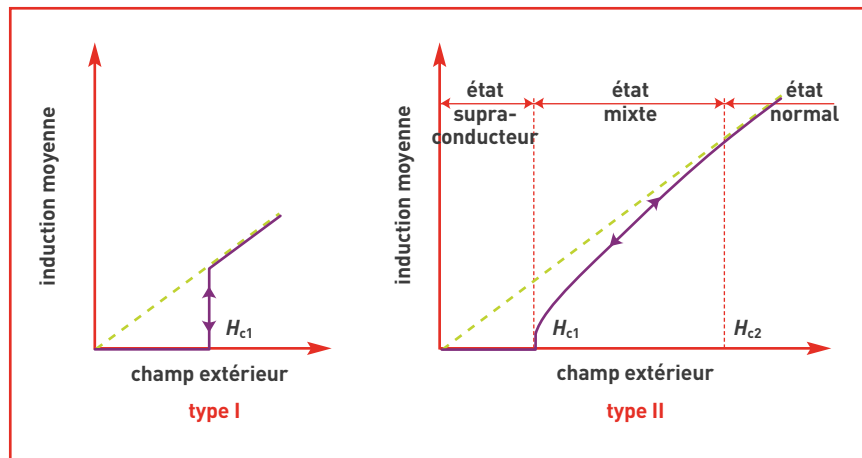


Figure 1. Induction moyenne dans des supraconducteurs de type I et de type II en fonction du champ extérieur.

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

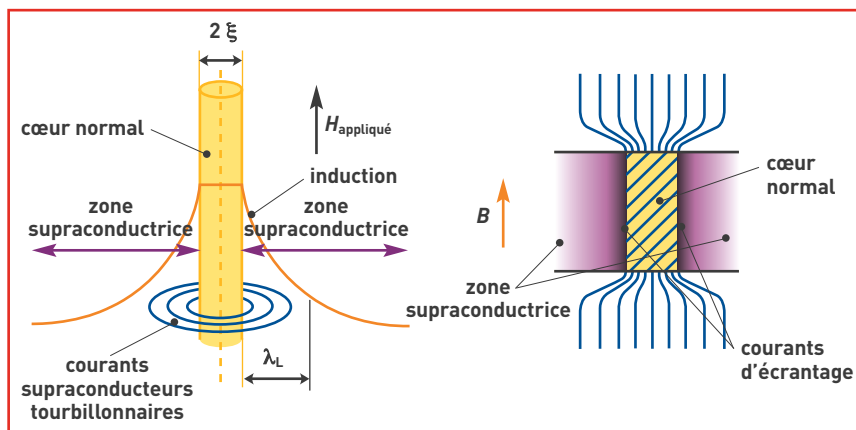
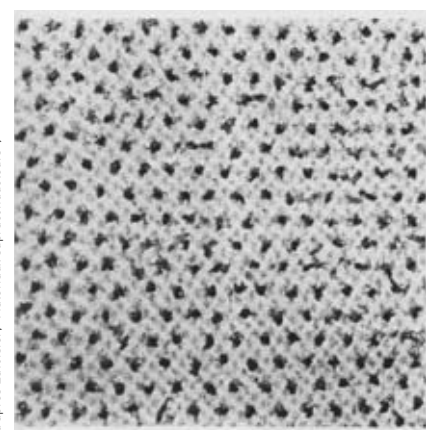


Figure 2. Schéma d'un vortex mettant en évidence la longueur de cohérence et la profondeur de pénétration.



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

(d'après Lavoisier, "Matériaux supraconducteurs")

(d'après Lavoisier, "Matériaux supraconducteurs")

U. Essmann et H. Träubel

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).



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.

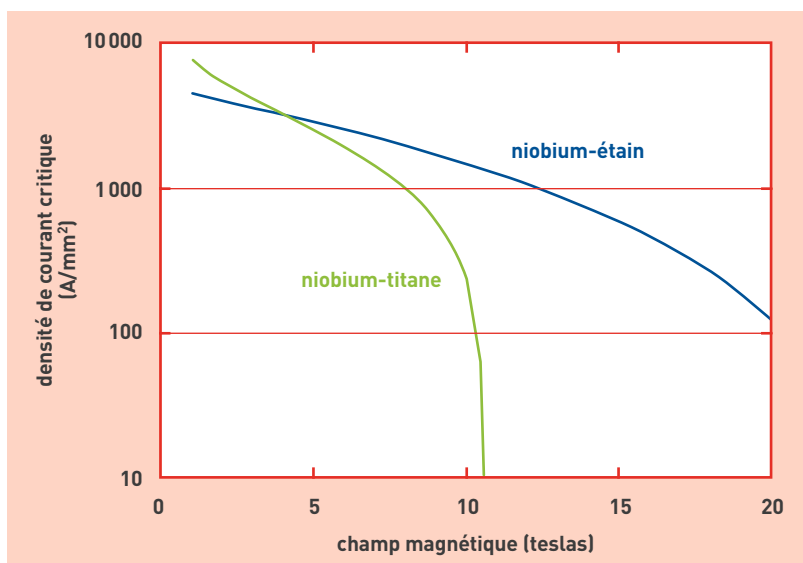


Figure 3. Densités de courant critique caractéristiques en fonction du champ magnétique à 4,2 K pour les deux matériaux supraconducteurs les plus utilisés, notamment pour la fabrication d'aimants supraconducteurs.

(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.

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*

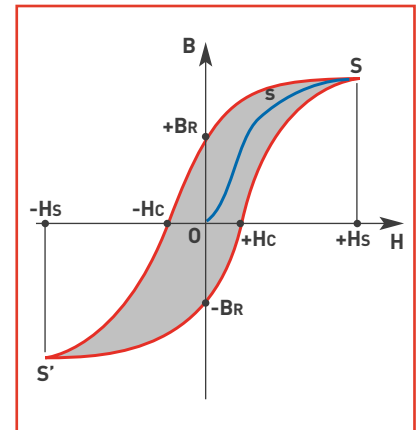


Figure E2. L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type OS sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend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

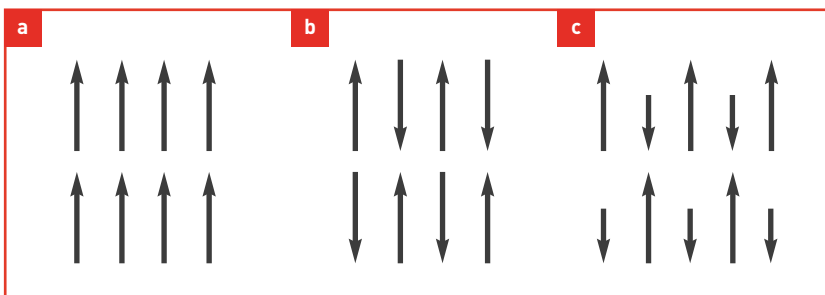


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



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.

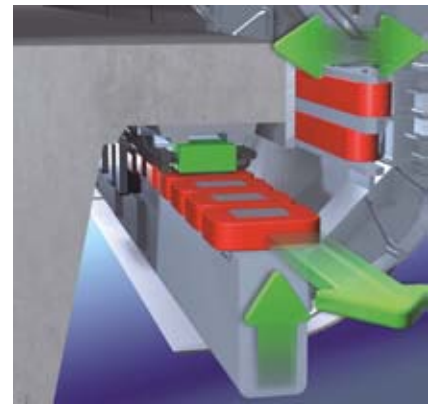
3. Les matériaux **diamagnétiques** présen-

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.

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 radiotraceur 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-

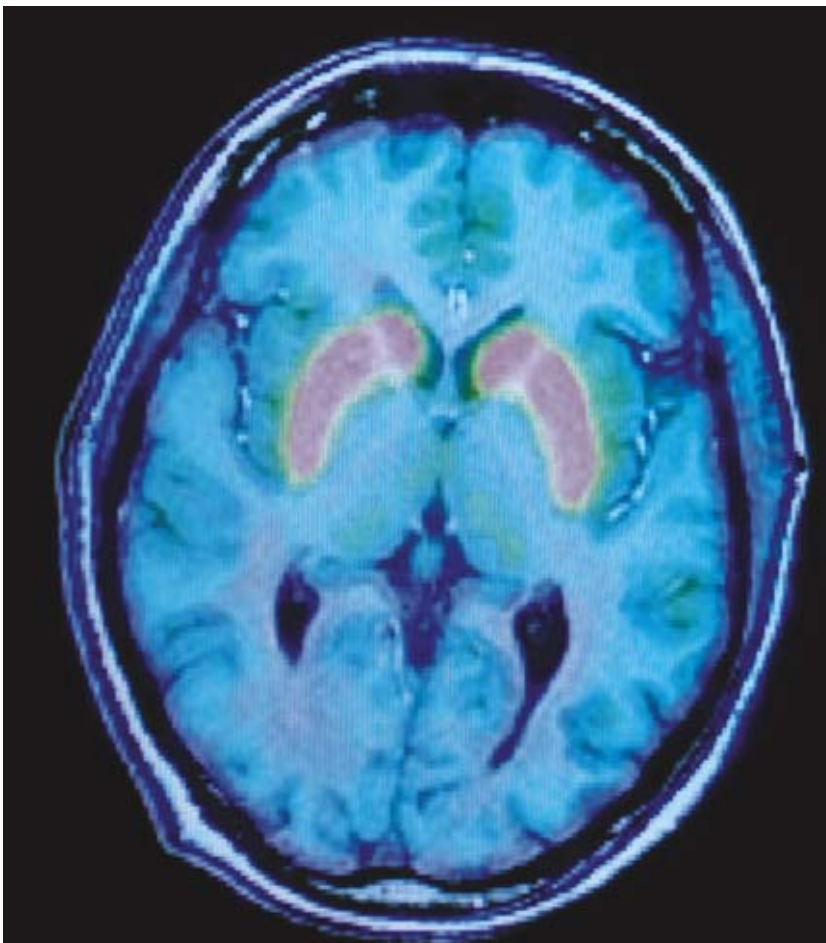
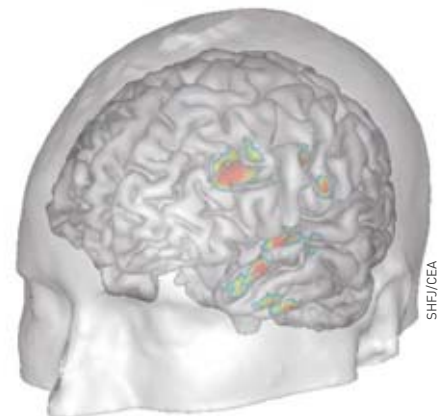


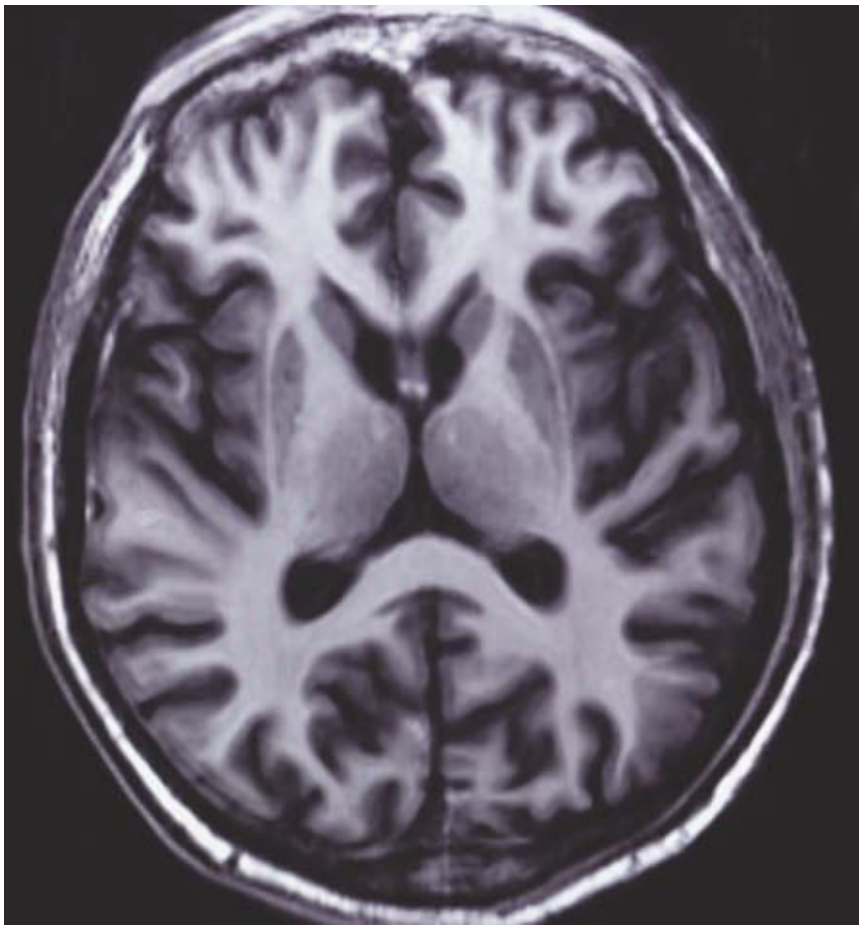
Image en TEP. Les positons émis par les traceurs radioactifs préalablement injectés au patient sont détectés par la caméra TEP, ce qui permet, après analyse informatique, de reconstituer une image en 3D de l'organe étudié.



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. Pouponnet, 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.