

## **Texte de la 596<sup>e</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs prononcée le 18 juillet 2005**

Par Geert Rikken: « **Physique en champ magnétique intense** »

### **Introduction**

Dans cette conférence je vais vous parler des champs magnétique intenses comme outil de recherche en physique. Vous pourrez voir que d'autres domaines s'en servent également. Je vais commencer avec par une petite introduction historique qui tracera un bref aperçu des lois fondamentales et des techniques pour générer les champs magnétiques intenses. Puis je présenterai trois grandes catégories dans lesquelles on peut classer l'utilisation des champs magnétiques intenses. D'abord il y a la manipulation magnétique ou des forces mécaniques font bouger et s'orienter des objets. Dans la deuxième catégorie on utilise un champ magnétique pour sonder l'état de la matière, c'est-à-dire l'état où elle serait en l'absence du champ magnétique. Puis, dans la troisième catégorie, le champ magnétique crée un nouvel état de la matière qui n'existe pas sans champ magnétique.

Dans la dernière catégorie, il n'y a pas trop d'applications quotidiennes quand on parle des champs très intenses. Pour la manipulation magnétique, il y a beaucoup plus d'application que vous connaissez sans doute, parce que la plupart se rencontrent dans la vie quotidienne. De l'autre côté, en termes d'intensité, c'est la dernière catégorie qui demande les champs les plus élevés et c'est là dessus que les laboratoires de recherche des champs intenses travaillent le plus.

### **Historique**

Le champ magnétique a fasciné les gens depuis près de 3000 ans. Les anciens chinois le connaissaient déjà et les Romains discutaient déjà l'origine du mot. On trouve deux versions dont l'une est proposée par Lucrétius faisait descendre le mot du nom de la région Magnésie qui se situe en Grèce, et où l'on trouve des aimants permanents constitués essentiellement d'oxyde de fer aimanté. Euclide racontait l'histoire d'un berger, Magnès, qui aurait découvert le phénomène parce que les clous dans ses bottes étaient attirés par certaines pierres. C'est ainsi que l'on aurait donné son nom au phénomène.

Au Moyen Age il y a eu beaucoup d'histoires autour du magnétisme, et les gens ont cru qu'il était médicinal, ou même diabolique. Il faut attendre 1600 pour voir le premier traité scientifique sur le magnétisme. Il est l'œuvre de William Gilbert, le médecin de la Reine d'Angleterre Elizabeth. C'est à cette période que l'électricité a commencé à faire son apparition. Jusqu'en 1820 on considérait que les deux étaient complètement différents, l'un n'ayant rien à faire avec l'autre. C'est le danois Christian Oersted qui a démontré expérimentalement, et par pur hasard, que les deux sont intimement liés. Alors qu'il effectuait une expérience en électricité sur une table se trouvait à proximité sur une autre table une boussole pour une expérience de magnétisme. Il constata que la boussole bougeait quand il faisait passer un courant électrique sur la première table. C'était la preuve que le courant créait un champ magnétique. Une dizaine d'années plus tard Faraday démontra à l'inverse qu'un champ magnétique variable pouvait créer un champ électrique. Tous ces phénomènes ont finalement été résumés par Maxwell dans une forme mathématique qui lie le champ

magnétique, le champ électrique, le courant et les charges. Il en donna ainsi une description homogène et cohérente qui s'est avéré correcte jusqu'aujourd'hui.

Depuis, de nombreuses recherches ont été menées dans le domaine des champs magnétiques comme le montre la liste des prix Nobel liés aux résultats obtenus en champ magnétique ou autour de ce domaine (Cf. **figure 1**). Parmi ces prix certains ont été décernés en physique, d'autres en chimie et en médecine, certains pour des découvertes de phénomènes fondamentaux et d'autres également pour de l'instrumentation développée autour des champs magnétiques, comme par exemple le cyclotron ou le spectromètre de masse qui sont tous les deux basés sur le champ magnétique.

### **Prix Nobel liés aux champs magnétiques**

- 1902** Physique H.A. Lorentz and P. Zeeman: Effets magnétiques sur la radiation
- 1922** Chimie F. Aston: Spectrographe de masse
- 1939** Physique E. Lawrence: Développement du cyclotron
- 1943** Physique O. Stern: Moment magnétique du proton
- 1944** Physique I. Rabi: RMN des atomes et molécules
- 1952** Physique F. Bloch, E. Purcell: RMN dans la matière condensée
- 1955** Physique P. Kusch: Mesure du moment magnétique de l'électron
- 1970** Physique L. Neel: Anti-ferromagnetism, ferrimagnetism
- 1977** Physique P. Anderson, N. Mott, J. van Vleck: Systèmes magnétiques et désordonnés
- 1985** Physique K. von Klitzing: L'effet Hall quantique
- 1991** Chimie R. Ernst: RMN bidimensionnel et par transformée de Fourier
- 1998** Physique R. Laughlin, H. Stormer, D. Tsui: L'effet Hall quantique fractionnaire
- 2002** Chimie K. Wuthrich: RMN des macromolécules biologiques
- 2003** Médecine P. Lauterbur, P. Mansfield: Imagerie par résonance magnétique

*figure 1*

### **Les lois fondamentales**

Souvent des gens me demandent « qu'est-ce qu'un champ magnétique ? », et je n'ai pas vraiment de réponse satisfaisante. Une réponse brève et simple est que c'est une manifestation du champ électromagnétique. Il faut simplement accepter de considérer que l'électromagnétisme est une des quatre interactions fondamentales de l'univers et qu'il n'est pas possible de le réduire à des choses encore plus élémentaires. Une autre définition assez utile du champ magnétique est que c'est une influence qui entoure une charge électrique qui bouge.

En électricité, l'objet élémentaire est la charge électrique, en magnétisme les choses ne sont pas si simples. Il n'existe pas une charge magnétique, l'objet élémentaire est le dipôle magnétique qu'on peut s'imaginer comme un courant circulaire. Le moment magnétique correspondant est le rayon fois la vitesse fois la charge et ce moment crée un champ magnétique autour de lui.

Les lois fondamentales classiques du champ magnétique sont assez simples.

D'abord, il y a la force de Lorentz qui dit qu'une charge qui bouge dans un champ subit une force perpendiculaire à la vitesse et au champ. Dans un champ magnétique homogène, un électron fait donc un mouvement circulaire, qui s'appelle le mouvement cyclotron, caractérisé par le rayon cyclotron et la fréquence cyclotron. Deuxièmement, un champ magnétique induit un moment magnétique dans n'importe quelle matière, c'est-à-dire également dans celle qu'on appelle non-magnétique. Si le moment induit s'oppose au champ, on parle de diamagnétisme, si c'est l'opposé, on parle de paramagnétisme. Finalement, l'énergie d'un dipôle dans un champ est le produit scalaire du moment et du champ, qui fait qu'un dipôle préfère être parallèle au champ. Cette énergie s'appelle l'énergie de Zeeman.

Dans la recherche moderne, les champs magnétiques sont souvent appliqués à des systèmes quantiques, dans la physique des solides ou la physique atomique. Dans ces systèmes, les lois quantiques sont dominantes. Le premier phénomène quantique surprenant, lié au champ magnétique est que les particules comme les électrons ou les protons ont un moment magnétique intrinsèque, qu'on appelle le spin. Pour employer une image simple, il faut imaginer que ces particules chargées tournent autour d'un axe. La mécanique quantique dit que le spin des électrons ne peut avoir que deux valeurs, up et down. Il n'existe aucune explication classique pour ce phénomène qui a été découvert expérimentalement sans aucune prévision théorique. Dans la mécanique quantique, il existe aussi un mouvement cyclotron, mais plus compliqué et bien sûr quantifié. Le rayon cyclotron, quantifié, est proportionnel à la longueur magnétique, qui correspond pour un champ d'un Tesla à 25 nanomètres, ce qui fait que les champs magnétiques trouvent aujourd'hui beaucoup d'emploi dans les nanosciences. L'énergie cyclotron est quantifiée, et proportionnelle à la fréquence cyclotron. On appelle ces niveaux d'énergie les niveaux de Landau. Le dernier aspect quantique un peu bizarre du champ magnétique est que le champ lui-même devient quantifié, et n'est plus un paramètre continu. Le quanta de flux magnétique est donné par des constantes fondamentales et correspond au champ magnétique qui traverse la surface d'une orbite cyclotron fondamentale d'un électron. L'intensité du champ correspond maintenant à la concentration des quantum de flux.

Cela nous amène au dernier aspect quantique de la physique en champ magnétique. La mécanique quantique connaît deux grandes familles de particules. D'un côté, il y a la famille des fermions, qui consiste en particules qui ont un spin non entier, très souvent  $\frac{1}{2}$ , et qui ont comme particularité de ne pas pouvoir se partager un état à une énergie donnée. Les électrons et les protons en sont des exemples. D'un autre côté, il y a la famille des bosons, qui consiste en particules qui ont un spin entier, et qui ont comme particularité qu'il peuvent se partager un état à une énergie donnée. Les photons et certains atomes sont des exemples de bosons. La différence entre bosons et fermions devient importante quand on met beaucoup de particules ensembles. Les fermions ne veulent pas être tous à la même énergie et beaucoup d'entre eux sont donc forcés d'occuper des états à plus hautes énergies. A une température égale à zéro, le niveau de Fermi sépare les états vides des états remplis. Pour les bosons, les choses sont complètement différentes. A une température inégale à zéro, les bosons occupent une gamme d'énergie à cause des excitations thermiques. Mais si on baisse suffisamment la température, il peuvent tous se partager l'état de la plus basse énergie et ainsi créer un état cohérent. Cette transition s'appelle la condensation de Bose-Einstein, et fournit l'explication de la superfluidité de hélium liquide et de la supraconductivité (Cf. **figure 2**).

## La statistique quantique

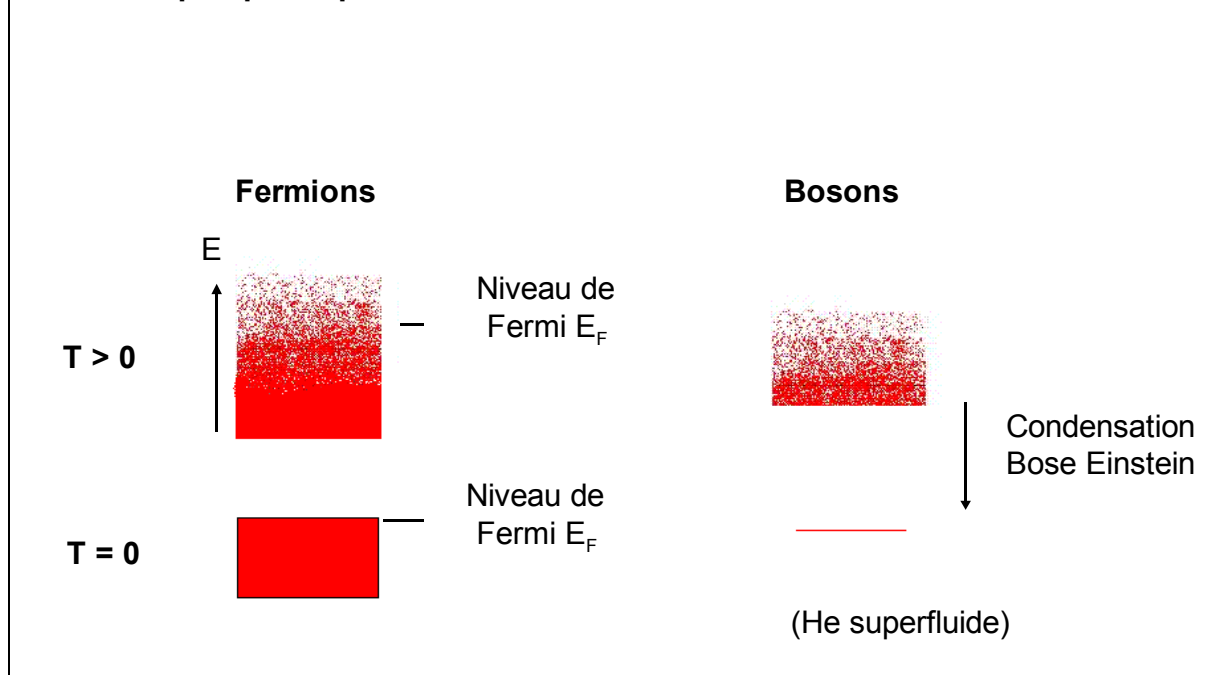


figure 2

La supraconductivité est un phénomène qui a une relation à la fois difficile et fructueuse avec le champ magnétique, comme on le verra après. Dans certains cristaux se crée une attraction entre les électrons, malgré la répulsion Coulombienne, qui est le résultat de la déformation du cristal par les électrons. Deux électrons peuvent ainsi former une paire, appelé paire de Cooper, dans laquelle ils ont leurs moments cinétiques et leurs spins opposés. Cette nouvelle entité, la paire de Cooper, a donc un spin totale égal à zéro et est un boson. A une température suffisamment basse, toutes les paires peuvent condenser dans un état quantique cohérent. Cet état, observé pour la première fois par Kamerlingh Onnes en 1911, a deux propriétés remarquables : la résistivité électrique égale à zéro, d'où le nom supraconductivité, et le champ magnétique expulsé de l'intérieur du cristal, ce que l'on appelle l'effet Meissner. Cet effet existe jusqu'à une valeur critique du champ. Les champs plus intenses détruisent la supraconductivité parce que le deux spins de la paire de Cooper veulent tous les deux s'aligner avec le champ, annihilant ainsi la paire de Cooper et la supraconductivité.

## La pratique des champs intenses

Les ordres de grandeur des champs magnétiques qu'on rencontre sont très divers. Autour de nos cerveaux on trouve des champs extrêmement faibles, liés aux activités cérébrales, et utilisés pour étudier ces dernières. Dans l'espace intra stellaire on trouve des champs faibles dont personne ne connaît l'origine. Le champ le plus connu est bien sur celle de la Terre qui fait aligner nos boussoles. Les aimants permanents ont un champ entre 0,1 et 1 Tesla. Des champs plus intenses sont générés par des électro-aimants, qui peuvent aller jusqu'à 1000 Tesla. La Nature a trouvé des moyens plus efficaces, et sur certaines étoiles, appelés les magnétars, les astronomes ont observés des champs d'un milliard de Tesla.

Dans ce qui suit je ne parlerai plus des champs faibles, en dessous d'un Tesla, pour me concentrer sur les champs intenses, créés par des électro-aimants (**Cf. figure 3**).

## Ordres de grandeur des champs magnétiques

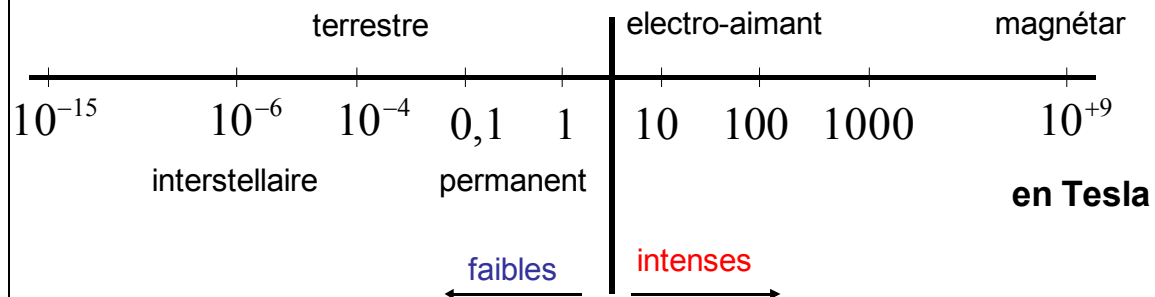


figure 3

La seule méthode de créer un champ magnétique intense est de faire circuler un courant électrique très fort dans un solénoïde. Il y a deux problèmes à résoudre.

D'abord il y a le réchauffement du conducteur à cause du courant électrique. Pour éviter ce réchauffement, on peut utiliser un fil supraconducteur à basse température, qui n'a aucune résistivité électrique. Cette approche est limitée par les champs magnétiques critiques qui détruisent la supraconductivité. L'alternative consiste à refroidir le conducteur pour enlever la chaleur générée par la dissipation électrique.

Le second problème est la force de Lorentz. Le courant et le champ magnétique qu'ils génèrent ensemble créent une force de Lorentz qui va radialement vers l'extérieur, comme si le champ créait une pression magnétique à l'intérieur qui fait exploser le solénoïde quand elle devient trop forte (Cf. figure 4). Pour remédier à ce problème, les électro-aimants sont construits avec des conducteurs ultra forts, ou avec un renfort externe.

### Pression magnétique

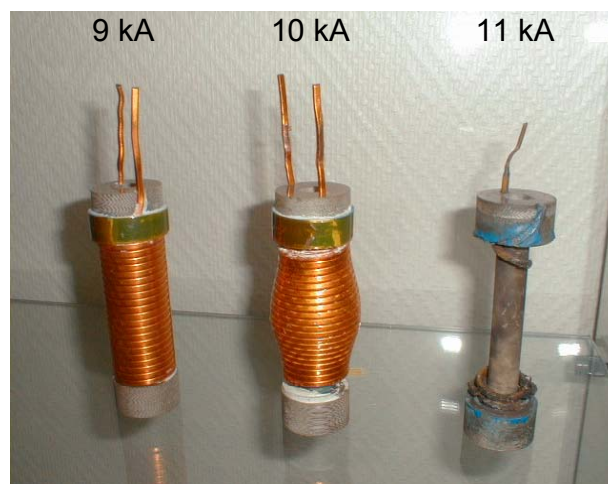


figure 4

Les champs magnétiques intenses statiques jusqu'à quelques Tesla sont générés avec des fils en cuivre sur un noyau en fer, le plus fort de ce type étant l'aimant de Bellevue, construit au début du 20<sup>ème</sup> siècle, qui a atteint 7 Tesla. Des champs atteignant jusqu'à 22 Tesla peuvent être générés avec des fils supraconducteurs refroidis avec de l'hélium liquide. Pour aller encore plus haut, la seule méthode consiste à utiliser du cuivre comme conducteur, en prenant soin de baisser la température par refroidissement à l'eau. Des puissances électriques jusqu'à 20 MW, refroidies avec 300 litres d'eau froide par seconde, permettent de générer jusqu'à 33 Tesla. En combinant les deux dernières techniques, on construit des aimants hybrides, qui ont généré jusqu'à 45 Tesla.

Pour aller plus haut en champ, on doit se contenter des champs transitoires, avec des durées en dessous d'une seconde. A Toulouse on produit des champs jusqu'à 60 Tesla avec des bobines monolithiques, faites d'un fil ultra fort et d'un renfort externe. Avec deux bobines concentriques on peut mieux répartir les contraintes mécaniques et atteindre jusqu'à 77 Tesla, comme l'a démontré récemment une collaboration européenne basée à Toulouse. Si on veut aller encore plus haut il faut accepter que la bobine soit détruite pendant le tir. Les bobines « monospire » sont constituées d'une seule spire en cuivre, qui explose radialement vers l'extérieur pendant un tir, laissant l'expérience au centre de la bobine intact. De cette façon on peut créer jusqu'à 300 Tesla. Les champs les plus intenses sont générés par la compression de flux ; le champ créé par une petite bobine est comprimé par un cylindre en cuivre qui à son tour est comprimé par une explosion. Des champs jusqu'à 2000 Tesla ont été obtenus, mais l'expérience a été complètement détruite par l'explosion (Cf. figure 5).

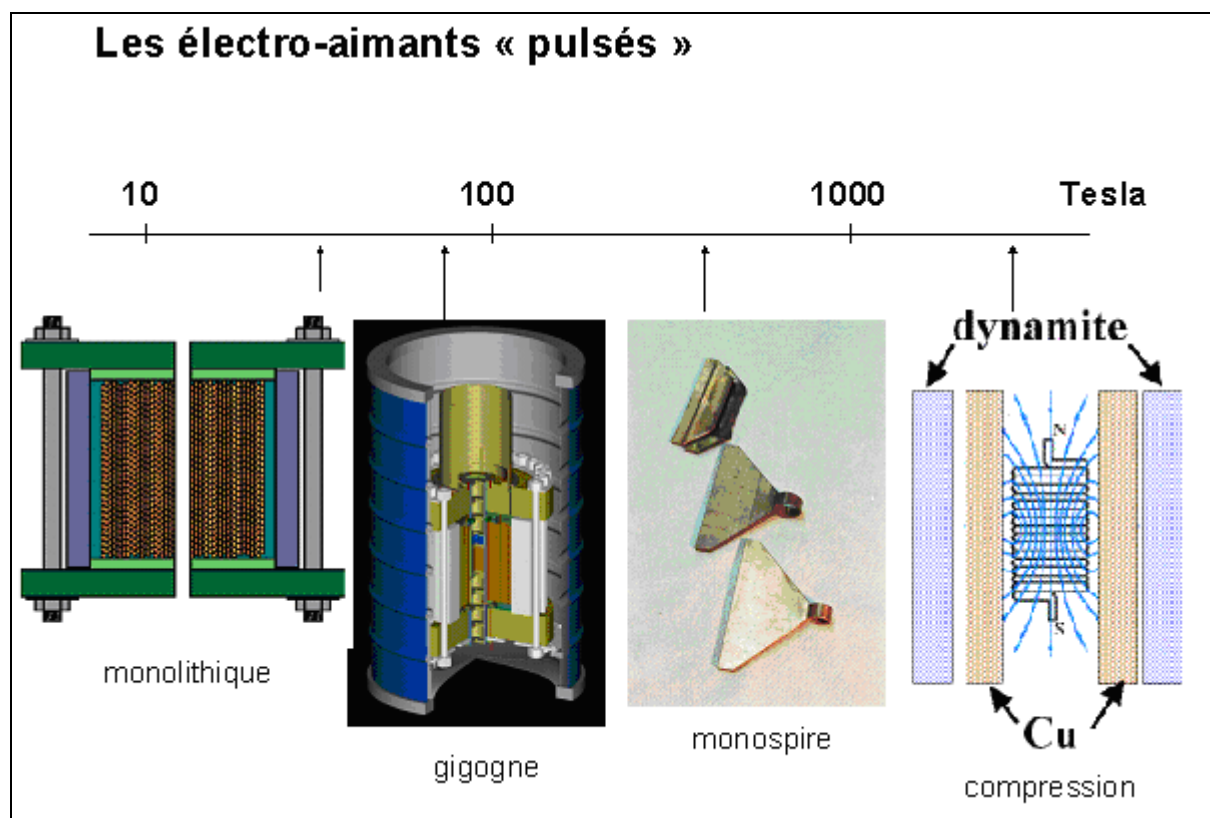


figure 5

## Applications des champs intenses ; manipulation magnétique

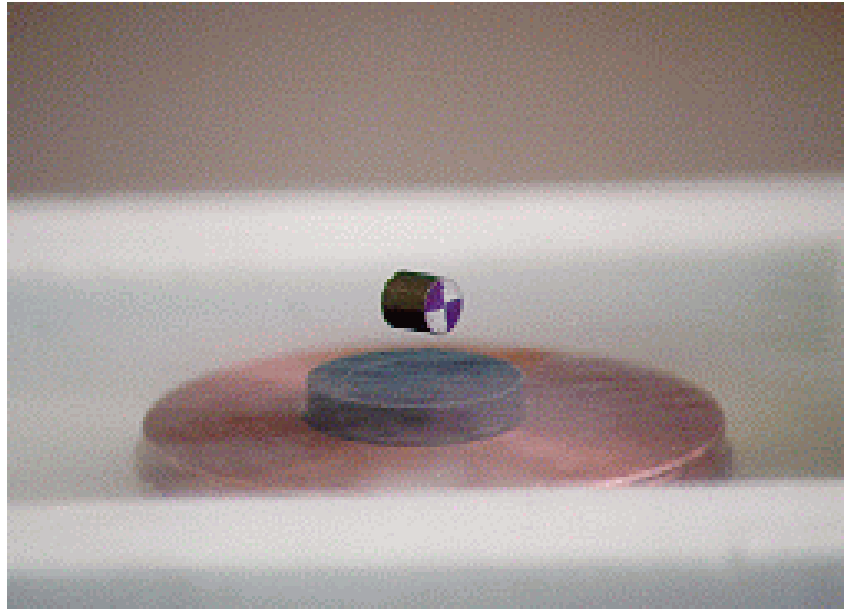
Après cette partie technique, passons maintenant aux applications des champs.

La première catégorie d'application est la manipulation magnétique. Ce qui est très connue c'est bien sur l'orientation magnétique, comme, par exemple, dans le cas d'une boussole. On connaît un peu moins la séparation magnétique qui permet d'enlever des composant magnétique d'un mélange, par exemple les ordures ménagères. Assez actuel, avec l'arrivée d'ITER en France, est le confinement magnétique ou l'on peut confiner des particules chargés dans une volume sans qu'ils touchent le parois. Dans les tokamaks, comme ITER, un plasma ultra chaud est ainsi confiné. Toutes ces applications, ainsi que d'autres, comme la réfrigération magnétique ou le frein magnétique, impliquent des champs assez modestes, de quelques Tesla.

Ce qui est plus intéressant en termes de champs intenses est la lévitation magnétique. Non seulement cela demande des champs plus forts mais en outre il semble exister un problème fondamental pour ce phénomène. Il y a un vieux théorème, appelé le théorème d'Earnshaw, qui dit qu'il n'est pas possible d'atteindre une lévitation stable de charges ou d'aimants dans un champ magnétique statique. Si vous avez jamais essayé de prendre deux aimants permanents et d'en faire léviter un au dessus de l'autre, vous savez que c'est effectivement impossible. Il existe deux façons de contourner le théorème d'Earnshaw. La première est la lévitation dynamique, la deuxième la lévitation diamagnétique. Commençons avec la lévitation dynamique. Si le théorème d'Earnshaw interdit la lévitation stable, la stabilité nécessaire à conditions que l'on puisse activement réguler la lévitation. Par exemple on peut avoir une attraction entre un aimant permanent et un électro-aimant. Dès qu'ils se rapprochent trop, on réduit le courant dans l'électro-aimant pour qu'ils s'éloignent. Dès qu'ils s'éloignent trop, on augmente le courant etc. Il faut donc un système électronique de rétroaction pour arriver à une lévitation quasi stable. Ce principe a été implémenté dans le train à lévitation allemand TransRapid, ce qui lui permet d'avancer, sans friction avec les rails, à des vitesses allant jusqu'à 500 km/h.

Avec la lévitation diamagnétique on se sert d'une autre astuce pour contourner le théorème d'Earnshaw ; le diamagnétisme. Le diamagnétisme, ou le matériau repousse le champ magnétique, est un phénomène purement quantique, qui n'est pas couvert par le théorème d'Earnshaw. Dans un champ magnétique inhomogène, le champ exerce une force sur le matériau diamagnétique qui peut compenser la force gravitationnelle, permettant ainsi de faire léviter l'objet. Pour de l'eau, il faut un gradient magnétique d'à peu près  $1000 \text{ T}^2/\text{m}$  pour que la lévitation ait lieu, valeur que l'on peut obtenir grâce à des électro-aimants performants. Par exemple, des êtres vivants, qui sont constitués principalement d'eau, peuvent être lévités ainsi en simulant l'apesanteur, une méthode bien sur moins chers que celle qui consiste à les envoyer dans une station spatiale. On peut aussi utiliser la lévitation diamagnétique comme outil de recherche pour étudier par exemple les interactions entre des gouttes d'eau, qui montrent des collisions élastiques sans fusion. On peut observer la lévitation diamagnétique à son extrême en faisant léviter un aimant permanent au dessus d'un supraconducteur, l'effet Meissner du supraconducteur représentant le diamagnétisme total (Cf. **figure 6**).

# Lévitation supraconducteur



*figure 6*

## Applications des champs intenses ; sonder la matière

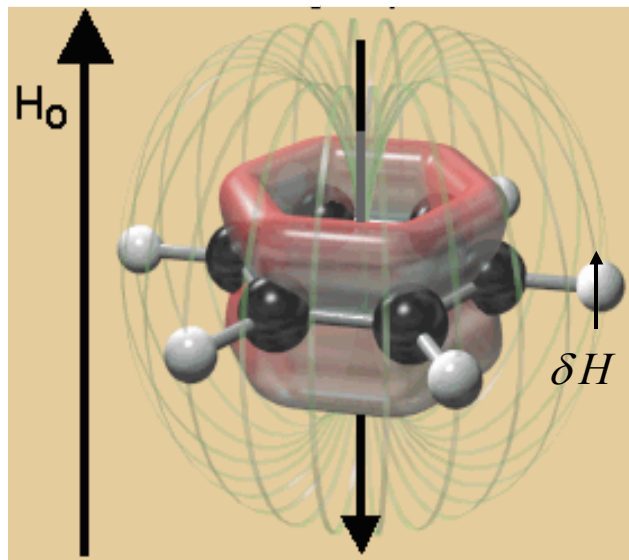
La deuxième catégorie des applications des champs intenses concerne le champ magnétique utilisé comme outil pour sonder la matière et déterminer ses propriétés, y compris des propriétés non-magnétiques. La première est l'effet Hall, qui est une conséquence de la force de Lorentz et qui fait qu'un courant qui passe perpendiculairement à un champ, crée un champ électrique perpendiculaire à ce courant et à ce champ. Cet effet permet de déterminer **le signe de large des porteurs** et leur concentration. La deuxième application dans cette catégorie est la résonance magnétique. Comme je l'ai expliqué avant, un moment magnétique quantique peut avoir deux valeurs, spin up et spin down, et ces deux états sont séparés par l'énergie de Zeeman. Si on irradie ce moment avec de la radiation électromagnétique, dont la fréquence correspond exactement à cette énergie, cette radiation peut être absorbée, le spin sera tourné du down vers le up et on parle alors de résonance. Ce principe peut être appliqué à plusieurs types de moments magnétiques. Pour les spins nucléaires, on parle de résonance magnétique nucléaire (RMN) et les fréquences nécessaires sont entre 10 et 1000 MHz. Si on l'applique aux spins des électrons, on parle de résonance paramagnétique des électrons (RPE) et les fréquences sont typiquement mille fois plus hautes, entre 10 et 1000 GHz. On peut aussi l'appliquer aux moments magnétiques orbitaux, comme le mouvement cyclotron des électrons (on parle de résonance cyclotron, dans le domaine de fréquences terahertz) ou des ions. Ces ions on peut les créer en ionisant des molécules et ainsi on peut déterminer la masse des molécules avec une très haute précision en mesurant la fréquence de résonance avec une haute précision. Dans ce qui va suivre je souhaite montrer pourquoi la RMN et sa dérivé, l'IRM (imagerie par résonance magnétique), sont tellement puissantes et utiles.

L'essentiel est que la RMN sonde le champ magnétique local d'un spin nucléaire. Si vous imaginez par exemple une molécule de benzène avec un champ perpendiculaire à l'anneaux



des atomes de carbones, le moment magnétique induit dans les électrons de la molécule crée son propre champ magnétique qui est superposé au champ externe et qui fait que les protons dans le noyau des atomes d'hydrogène qui sont à l'extérieur de cet anneau, voient un champ local légèrement différent (Cf. **figure 7**). Leur fréquence de résonance sera donc un peu différente que la valeur pour un proton libre et cette différence est une empreinte pour l'environnement chimique de ces protons. En mesurant les différentes fréquences de résonances des protons dans une molécule organique, on peut déduire l'environnement chimique de chaque type de proton et ainsi reconstruire la structure de la molécule. Aujourd'hui la RMN est une des méthodes d'analyse les plus performantes en chimie organique. Des champs magnétiques très intenses sont nécessaires pour analyser les solides par RMN, parce que les raies de résonance sont beaucoup plus larges.

## Champ local dans un molécule



*figure 7*

Vous connaissez probablement tous quelqu'un qui a subi un examen d'imagerie par résonance magnétique, qui est une application récente de la RMN. Dans l'IRM on utilise toujours la RMN pour sonder le champ local, mais maintenant à une échelle macroscopique quand on applique un champ magnétique avec un gradient. La position le long du gradient se traduit dans une fréquence de résonance, et l'intensité de l'absorption à cette fréquence se traduit dans la concentration des noyaux à cette position dans le gradient. En faisant ces mesures avec des gradients en trois directions, un ordinateur peut reconstruire un plan tri-dimensionnel de la concentration de ces noyaux, qui peut alors être interprété par un médecin. La troisième catégorie des sondes magnétiques de la matière est constituée des oscillations quantiques. Pour des fermions, les variations de l'énergie de Landau et du rayon du cyclotron avec le champ magnétiques font que le niveau de Fermi, et donc toutes les propriétés électroniques, vont varier périodiquement avec  $1/B$ . Il y a plusieurs manifestations de ces variations, appelés oscillations quantiques. La plus connue est l'oscillation de l'aimantation

du système appelée l'effet de Haas van Alphen. On peut aussi l'observer dans la résistivité électrique appelée effet Shubnikov de Haas. Avec ces oscillations, on peut déterminer la masse effective des électrons, leur temps de diffusion et leur surface de Fermi, la surface séparant les états vides des états remplis, en mesurant les oscillations en fonction de l'angle entre le champ et les axes du cristal.

### **Applications des champs intenses ; créer des nouveaux états**

Le troisième grand groupe d'application des champs magnétiques intenses est la création des nouveaux états de la matière condensée et je voudrais vous présenter trois catégories.

Dans les gaz bidimensionnels des électrons, les champs intenses créent les effets Hall quantique intégrale et fractionnaire, les deux découvertes couronnées avec un prix Nobel.

Le gaz bidimensionnel existe à l'interface entre deux couches dans certains dispositifs semi-conducteurs et comme pour tous les conducteurs il a un effet Hall que j'ai décrit avant. La grande surprise, observée par von Klitzing en 1980, était qu'on n'observe pas la prédiction classique, c'est-à-dire un effet Hall linéaire en champ magnétiques, mais des plateaux quantifiés dans la résistance de Hall, et des zéros dans la résistance longitudinale. L'explication de l'effet Hall quantique intégrale vient des impuretés dans le système. Ces impuretés font que les niveaux de Landau sont élargis et que les états loin du centre du niveau sont localisés. Tant que le niveau de Fermi se trouve dans ces états localisés, la résistance de Hall est donnée par le facteur de remplissage, c'est-à-dire, le nombre de niveaux de Landau en dessous du niveau de Fermi (et donc constant), et la résistance longitudinale est zéro parce que les porteurs mobiles n'ont pas d'états vides proches disponibles. Comme l'effet Hall quantique dépend des impuretés, il doit disparaître si on réussit à fabriquer des systèmes plus propres, ce qui a été observé. Mais en même temps un autre effet Hall quantique inattendu se manifestait. L'effet Hall quantique fractionnaire phénoménologiquement ressemble beaucoup à l'effet Hall quantique intégrale, mais cette fois ci, les plateaux et les zéros se trouvent à des facteurs de remplissage donnés par des fractions. L'explication de l'effet Hall quantique fractionnaire, donnée par Laughlin, et récompensée par un prix Nobel en 1998, est que les interactions entre les électrons deviennent dominantes et qu'une nouvelle entité se forme, constitué d'un électron avec deux quantum de flux magnétique et qu'on appelle un fermion composite. Dans cette description, l'effet Hall quantique fractionnaire des électrons devient l'effet Hall quantique intégrale des fermions composites.

La deuxième catégorie concerne la supraconductivité exotique. Depuis la découverte de la supraconductivité en 1911, la température critique (la température en dessous laquelle la supraconductivité existe) a monté doucement avec les découvertes de nouveaux matériaux. Un grand saut fut fait en 1986 avec la découverte d'une nouvelle famille de supraconducteurs ; les cuprates. Ils sont composés de couches d'oxyde de cuivre où la conduction électrique a lieu, séparés par des couches d'autres atomes, qui servent aussi pour injecter de la charge dans les couches d'oxydes de cuivre. Les structures cristallines sont assez compliquées et les diagrammes de phase de ces composés sont très riches, en particulier en fonction du dopage, c'est-à-dire du nombre d'électrons ou de trous par atome de cuivre, introduit par les autres atomes. On y trouve des phases isolantes, supraconductrices, anti-ferromagnétiques et métalliques. Le mécanisme de la supraconductivité dans les cuprates n'est pas bien connu, et aussi l'état normal des cuprates au dessus de la température critique est mal compris et on ne sait par exemple pas s'il est isolant ou métallique. L'approche normale pour discriminer entre un isolant et un métal est de refroidir le système, et de mesurer sa résistivité électrique. Pour un isolant, cette résistivité doit diverger tandis que pour un métal il devient constant. Pour les cuprates, cette approche n'est pas possible parce que la supraconductivité intervient. La solution est d'appliquer un champ magnétique intense pour supprimer la supraconductivité. Sous ces conditions, on peut mesurer la résistivité de l'état

normal jusqu'à de basses températures. Récemment on a ainsi observé dans des échantillons très purs d'YBaCuO que l'état normal est métallique.

Je vous ai expliqué qu'un champ intense tue la supraconductivité. Paradoxalement, le contraire existe aussi, de la supraconductivité induit par le champ magnétique ! C'est le cas dans certains conducteurs organiques qui contiennent des anions paramagnétiques. Les électrons de conduction sentent le champ externe et le champ d'échange des ions et les deux sont opposés. Pour une certaine gamme de champs externes, les deux champs se compensent à peu près, les électrons sentent donc très peu de champ total et la supraconductivité peut exister. Ce phénomène s'appelle l'effet Jaccarino-Peter.

La dernière catégorie où le champ magnétique crée des nouveaux états, fait partie du magnétisme quantique. Aujourd'hui, les chimistes savent synthétiser des nouveaux cristaux très purs des oxydes des métaux de transition. Les interactions entre les charges, les moments magnétiques orbitaux, les spins et les phonons donnent une grande richesse à ces systèmes, avec beaucoup de phases différentes en fonction de la température et du dopage. Que se passe-t-il si on ajoute encore une composante, le champ magnétique ? Un champ magnétique lui aussi peut induire une transition de phase, comme la température ou la pression. Cela devient clair si on regarde un système de deux électrons avec spin  $\frac{1}{2}$ . En général ils s'accouplent anti-parallèlement pour donner une paire avec spin zéro, l'état singlet. L'état parallèle avec le spin égal à un, appelé l'état triplet, a une énergie plus haute. Mais à partir d'un certain champ magnétique externe, à cause de l'effet Zeeman, l'état avec spin -1 a une énergie plus basse que l'état avec spin égal à zéro et le système change d'état. La combinaison des oxydes de métaux de transition avec la transition de phase magnétique a récemment donné quelques résultats remarquables. Le premier exemple est la condensation de Bose-Einstein des triplons dans le pourpre de Han. C'est un système des couches anisotropes de dimères des ions paramagnétiques de cuivre. Le résultat des interactions entre tous les ions est que l'état fondamental à champ zéro est non magnétique. L'application d'un champ magnétique intense fait croiser l'état triplet à l'état singlet. De leur mélange, une nouvelle entité sort : le triplon. A cause de leur spin entier, les triplons sont des bosons et il peuvent condenser à basse température dans un état cohérent : la condensation Bose-Einstein. Cette transition de phase magnétique est visible dans la chaleur spécifique. Avec des mesures de la chaleur spécifique en fonction de la température et du champ, on peut trouver le diagramme de phase et identifier le domaine du condensât des triplons.

Le deuxième exemple est aussi un système de couches d'ions de cuivre : le  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ . Dans ce système, des plateaux d'aimantation ont été observés. Récemment, des mesures de RMN à très basses températures et dans un champ très intense ont démontré que sur ces plateaux, le système a une superstructure magnétique très compliqué qui n'existe pas ailleurs.

C'est avec ce dernier exemple que je termine mon exposé. J'espère avoir pu vous montrer que la physique en champ magnétique intense est à la fois utile, puissante et fascinante. Je tiens à remercier tous mes collègues pour les discussions et pour m'avoir fourni des images.