



Université Mohammed V
Faculté des Sciences
Rabat



Département de Physique

Filière SMP – Semestre 5 - PHYSIQUE DES MATERIAUX 1

CHAPITRE 10

MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS

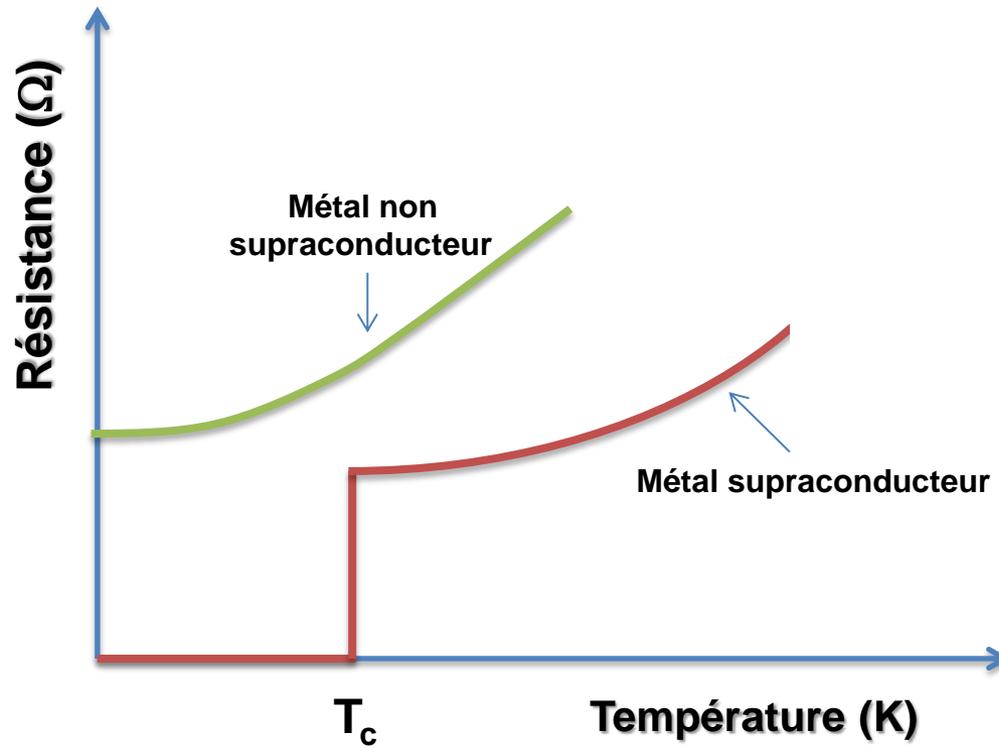
Pr. A. Belayachi
belayach@fsr.ac.ma

SOMMAIRE

1. Mise en évidence expérimentale de la supraconductivité
2. Fermions et bosons
3. Modèle BCS pour la supraconductivité
4. Effet Meissner
5. Classification des supraconducteurs
6. Matériaux supraconducteurs
7. Applications de la supraconductivité

1. Mise en évidence expérimentale de la supraconductivité

Sous certaines conditions la conductivité d'un matériau peut devenir infini (la résistivité nulle), le matériau devient alors **supraconducteur**. Le phénomène de supraconductivité n'apparaît qu'en dessous une certaine température appelée **température critique T_c** , mais il existe aussi une limite de l'intensité du courant qui le parcourt et qui est appelé **intensité critique I_c** . On montre expérimentalement que la résistivité d'un supraconducteur est **inférieure à $10^{-25} \Omega.m$** par comparaison avec la résistivité du cuivre à 300 K qui est de l'ordre de **$10^{-7} \Omega.m$** .



Différence de la variation de la résistance en fonction de la température pour deux métaux un supraconducteur et un autre non supraconducteur

2. Fermions et bosons

Dans un atome, deux électrons peuvent avoir la même énergie à condition que leurs spins soit différents. Ce sont des **Fermions** (du nom du physicien italien **Enrico Fermi**). L'électron, les nucléons sont des fermions. Par exemple la première orbitale ou couche électronique (la plus rapprochée du noyau) ne peut contenir que deux électrons qui ont la même énergie mais des spins opposés:

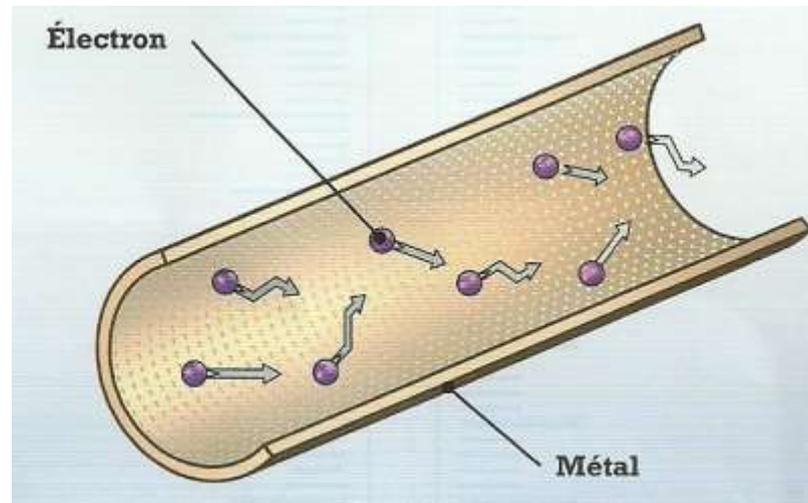
$$S = \pm \frac{1}{2}$$

Deux fermions identiques ne peuvent donc pas coexister au même endroit et dans le même état: cette interdiction s'appelle le **principe d'exclusion de Pauli**.

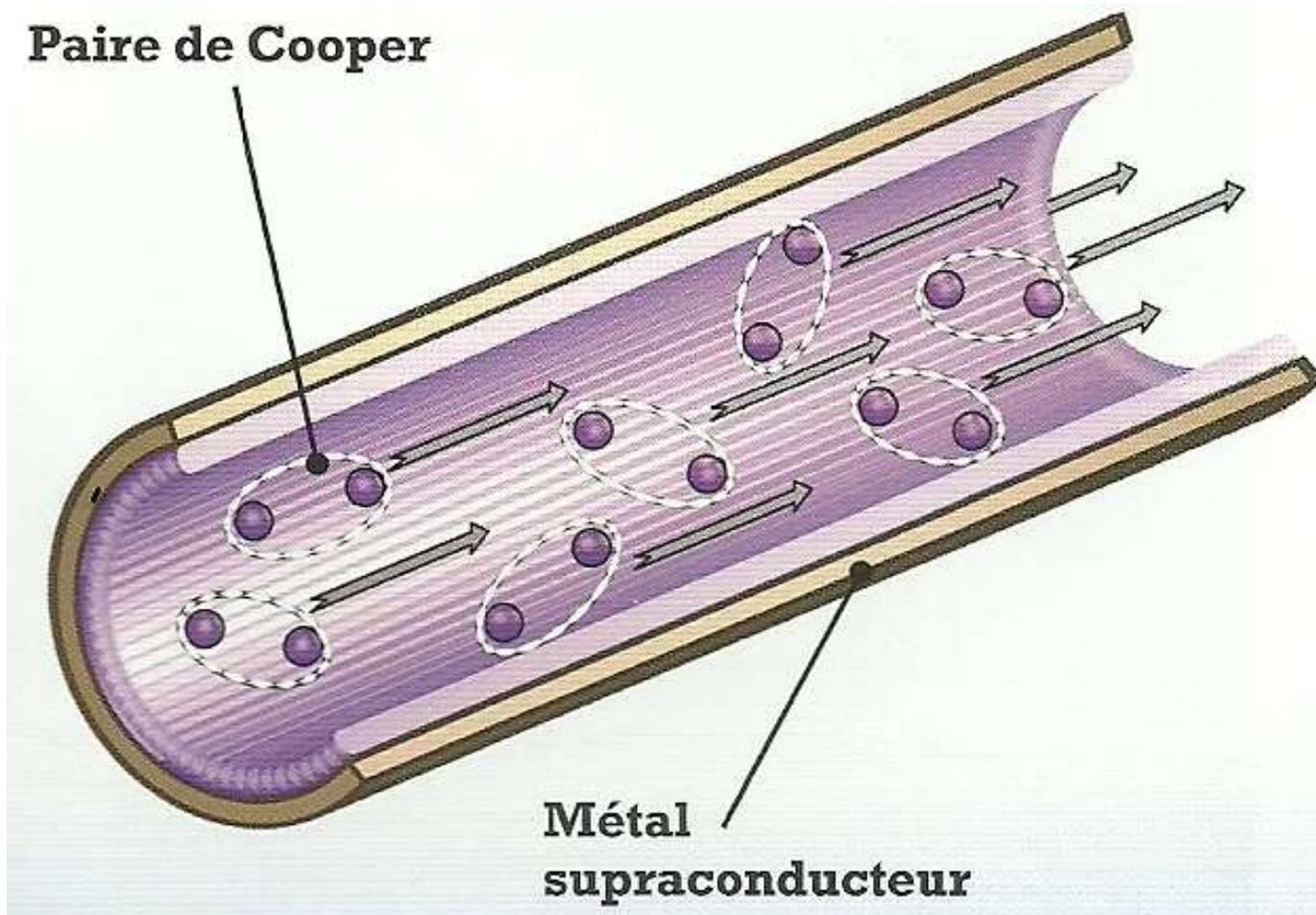
Les particules qui sont capables de se rassembler à plusieurs dans le même état physique sont les **Bosons** (du nom du physicien indien **Satyendranath Bose**). Le photon est un boson. Tous les fermions ont des spins de valeur demi-entière alors que tous les bosons ont des spins de valeur entière. Le fait qu'une particule soit un boson ou un fermion a d'importantes conséquences sur les propriétés statistiques observables en présence d'un grand nombre de particules : les fermions sont des particules qui obéissent à la **statistique de Fermi-Dirac** alors que les bosons obéissent à la statistique de **Bose-Einstein** . Plus généralement, les bosons montrent une tendance à s'agréger lors des processus d'interaction entre les particules.

3. Modèle BCS pour la supraconductivité

A la température ambiante les électrons d'un métal (Fermions) se comportent comme des ondes indépendantes les unes des autres. Dès qu'elles rencontrent un **défaut** ou un **phonon** ces ondes sont facilement perturbées et déviées. Certains électrons cèdent alors une partie de leur énergie au métal et sont ralentis. Le métal s'échauffe par effet joule : c'est la résistance électrique.

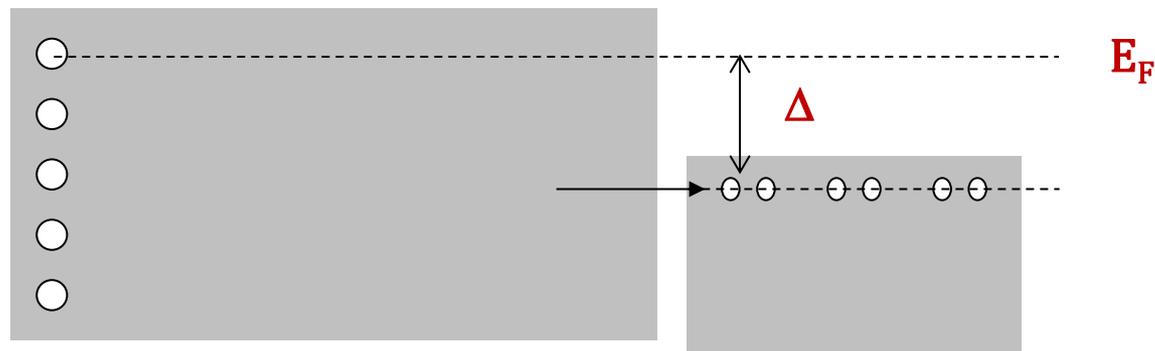


Le modèle **BCS** découvert en 1957 par **Bardeen, Cooper et Schrieffer**, qui leur valut le prix Nobel, permet expliquer la supraconductivité dans les métaux. Ce modèle est basé sur l'**hypothèse** d'une **interaction attractive**, à très basse température, entre les **électrons de conduction**, conduisant à la formation de paires d'électrons appelées **paires de Cooper**. Ces paires se comportent comme des **particules de spin entier**, et donc comme des **bosons**., Les paires de Cooper se superposent pour former une **grande onde collective le condensat**. Celui-ci occupe tout le matériau et est insensible aux défaut. Les paires se déplacent alors sans rencontrer la moindre résistance, d'où la supraconductivité.



Formation des paires de Cooper à très basse température dans un métal

Le modèle BCS permet de rendre compte d'un certain nombre de propriétés de la supraconductivité, dont la température critique. En effet, la formation de paires provoque l'apparition d'une bande interdite au voisinage du niveau électronique le plus haut occupé appelé niveau de Fermi (Cours de Physique des Matériaux II –SMP6).



L'énergie de chaque électron est abaissée d'une quantité Δ , et donc l'énergie nécessaire pour rompre une paire vaut:

$$E_g = 2\Delta$$

C'est l'énergie de gap du supraconducteur. Cette énergie peut être fournie par agitation thermique, et donc pour que le matériau reste (et donc soit) supraconducteur il faut que:

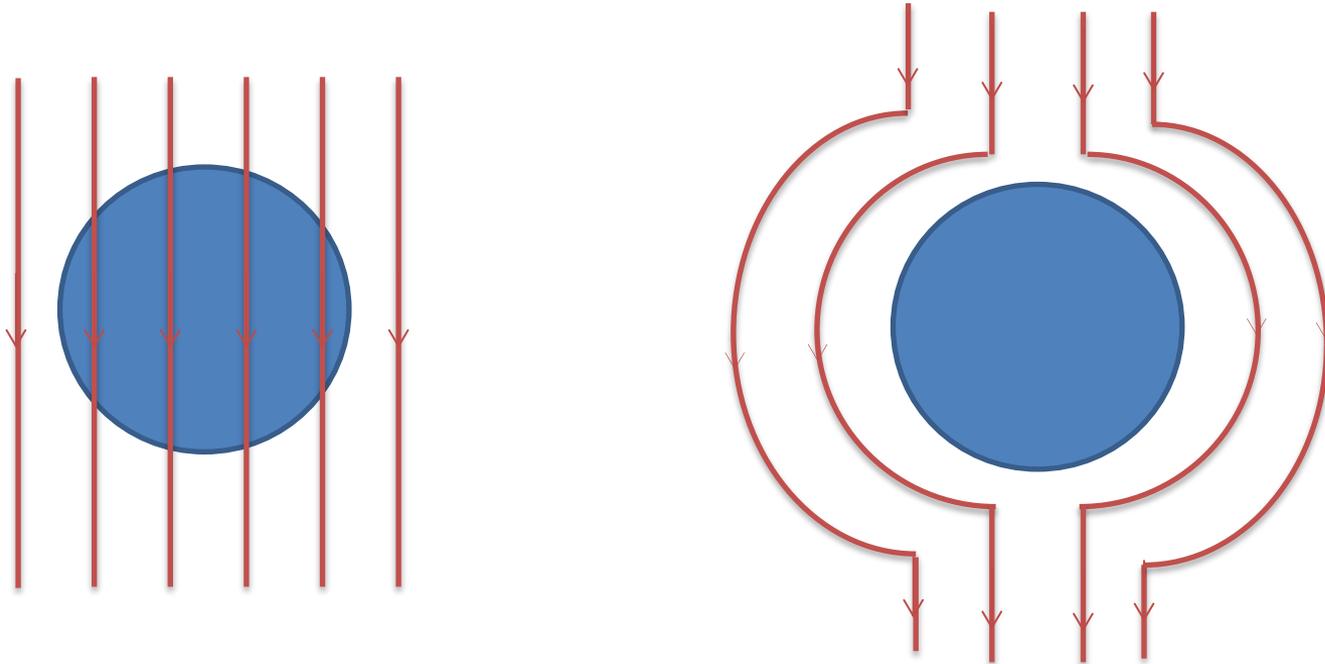
$$k_B T < E_g$$

Ce qui explique l'existence d'une température critique T_C définie par:

$$T_C = \frac{E_g}{k_B} = \frac{2\Delta}{k_B}$$

4. Effet Meissner

Lorsqu'un supraconducteur massif est placé dans un faible champ magnétique \vec{H} il agira comme un matériau diamagnétique parfait, avec une induction magnétique \vec{B} nulle dans le supraconducteur. C'est l'effet Meissner. Cependant un champ magnétique suffisamment fort a pour effet de détruire la supraconductivité. Le seuil, ou **valeur critique**, **du champ magnétique** qui détruit la supraconductivité est **noté H_c** , il dépend de la température.



Effet Meissner dans une sphère supraconductrice refroidie dans un champ magnétique uniforme, au dessous de la température critique les lignes de champ sont éjectés de la sphère

5. Classification des supraconducteurs

On appelle **supraconducteurs de type I** les supraconducteurs pour lesquels la valeur de H_c est trop basse pour qu'ils puissent être utilisés dans la construction des bobines pour aimants supraconducteurs.

Les **supraconducteurs de type II**, qui sont généralement des alliages, ont des propriétés supraconductrices jusqu'à un champ critique H_{c_2} . Entre le champ critique inférieur H_{c_1} et le champ critique supérieur H_{c_2} la densité de flux dans le supraconducteur est non nulle et l'effet Meissner est dit incomplet. Entre H_{c_1} et H_{c_2} le supraconducteur est parcouru par des lignes de flux, on dit qu'il est l'état vortex.

6. Matériaux supraconducteurs

Après la découverte de la **supraconductivité du mercure en 1911 par Onnes** on testa tous les éléments de la classification périodique. La plupart des métaux de transitions peuvent devenir supraconducteurs bien que les meilleurs conducteurs à la température ambiante à savoir le **cuivre, l'or et l'argent** ne présentent **pas de propriétés supraconductrices** alors que des éléments **isolants peuvent devenir supraconducteurs**. Le tableau suivant donne quelques exemples de matériaux supraconducteurs avec les valeurs des températures critiques et des champs critiques.

Matériaux	T _c (K)	B _c (T)	Matériaux	T _c (K)	B _c (T)
Al	1	0,01	La _{2-x} Sr _x CuO ₄	38	40
Pb	7,2	0,08	MgB ₂	39	>50
Nb-Ti	9	14	La(Fe,F)As	55	-
Nb	9,2	0,2	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.9}	92	>100
PbMo ₆ S ₈	15	60	Bi ₂ Ca ₂ Sr ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	>120
Nb ₃ Ge	23	38	Tl ₂ Ca ₂ Ba ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	>130

Valeurs des températures critiques et champs critiques pour quelques supraconducteurs

7. Applications de la supraconductivité

La supraconductivité est étudiée et appliquée dans de nombreux domaines.

7.1 Médecine

Dans le domaine de diagnostic médical, l'imagerie par résonance magnétique nucléaire IRM consiste à se servir des petits aimants que possèdent les noyaux des atomes du corps humain pour visualiser ce qui les entoure (le cerveau, les muscles...). Pour cela, il faut d'abord aligner ces aimants grâce à un champ magnétique dans lequel on place le patient. Plus grand est le champ, meilleure sera l'image.

Pour produire des champs intenses, il faut faire passer un fort courant électrique dans une bobine de plusieurs milliers de tours de fil . Si on utilise des fils de métal, du cuivre par exemple, ils vont tellement s'échauffer qu'ils finiront par fondre (**Série 10 TD**). Voilà pourquoi dans tous les appareils d'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) les bobines sont fabriquées avec du fil supraconducteur plongé dans un liquide très froid comme l'hélium.

NeuroSpin, voyage au centre du cerveau - YouTube



www.youtube.com/watch?v=GSBG6eVyLlc ▾

22 mars 2012 - Ajouté par CEASaclay

NeuroSpin vise à repousser les limites actuelles de l'imagerie cérébrale par résonance magnétique nucléaire à ...

7.2 Bobines supraconductrices

Les bobines supraconductrices permettent de produire des champs magnétiques de plusieurs teslas (1 tesla vaut à peu près 10 000 fois le champ de la Terre). Elles sont obtenus en utilisant des bobinages de plusieurs milliers de tours de fils supraconducteurs plongés dans l'hélium liquide, souvent à base d'alliages de niobium et de titane (NbTi) ou de niobium et d'étain (Nb₃Sn). Ces bobines sont souvent appelées « aimants supraconducteurs » par abus de langage. Ces champs magnétiques élevés sont utilisés pour la Résonance Magnétique Nucléaire en chimie et en physique, dans les laboratoires de physique pour étudier l'effet des champs sur les solides et explorer les ainsi les propriétés magnétiques matériaux.

7.3 Electronique et télécommunications

Malgré l'inconvénient des nécessaires basses températures, les propriétés exceptionnelles des supraconducteurs permettent de concevoir des circuits électroniques performants et originaux. Une électronique à base de matériaux supraconducteurs s'est donc développée, utilisant les supraconducteurs conventionnels ou les supraconducteurs à haute température critique. Ces systèmes sont désormais fiables, et ont quitté le cadre des laboratoires pour une utilisation par les industriels. Ainsi les filtres les plus performants disponibles pour les antennes relais des téléphones portables utilisent des supraconducteurs.

D'autres systèmes électroniques permettent de **protéger** les **circuits** des **surtensions**, ou de construire les appareils de mesure de champ magnétique ultra sensibles. D'autres développements de l'électronique supraconductrice se préparent actuellement dans les laboratoires, et déboucheront peut-être sur les prochaines révolutions technologiques. Ainsi la **jonction Josephson** remplacera-t-elle peut être le transistor à base de silicium de nos circuits actuels, permettant aux ordinateurs d'atteindre des cadences de 100 GHz?

La **supraconductivité** pourrait même être **utilisée** pour **construire un ordinateur quantique**, permettant le calcul massivement parallèle, mais qui **n'existe pour l'instant que sur papier**. L'électronique supraconductrice est donc une réalité dès aujourd'hui, même si son usage reste limité par les températures nécessaires à son bon fonctionnement. 21

7.4 Transport et stockage de l'énergie électrique

Les câbles électriques actuels ne peuvent cependant transporter que des courants limités sous peine de trop chauffer et de fondre. Un réseau de câbles supraconducteurs permettrait de résoudre ce problème car on peut y faire circuler 10 000 fois plus de courant électrique : des câbles plus petits pour plus de courant. Un tel réseau n'est pas encore rentable car il faut refroidir les câbles pour qu'ils soient supraconducteurs. Néanmoins des **prototypes de câbles en cuprates supraconducteurs** refroidis à l'azote liquide commencent à apparaître, sur de courtes distances.

Les supraconducteurs sont aussi utilisés comme limiteurs de courant dans les centrales électriques, des sortes de super-fusibles. Enfin, des supraconducteurs sont utilisés pour des solutions de stockage d'énergie électrique dans des dispositifs appelés SMES. Un courant électrique y est stocké dans une bobine supraconductrice que l'on referme sur elle même. Le courant reste piégé dans la bobine indéfiniment car il n'y a rigoureusement aucune perte d'énergie, et ce courant peut être récupéré à volonté et surtout en un temps très court, contrairement aux piles habituelles.

7.5 Confinement magnétique

La fusion est la source d'énergie du soleil et des autres étoiles. Une étoile commence à briller quand la matière en son cœur atteint, sous l'effet des forces de gravitation, des densités et des températures suffisantes pour déclencher des réactions thermonucléaires libérant de l'énergie. La tendance du plasma à se disperser, donc à se refroidir, est contrebalancée par la force gravitationnelle. Sur terre, le confinement gravitationnel est impossible. Deux voies sont étudiées pour reproduire ces réactions. Porter à très haute pression et à haute température un petit volume de matière pendant un temps extrêmement court.

On parle alors de *confinement inertielle*. On cherche ainsi à obtenir le plus grand nombre possible de réactions de fusion avant que le plasma ne se disperse.

- Piéger et maintenir à très haute température un plasma. Ce plasma est confiné dans une boîte immatérielle de forme torique créée par des champs magnétiques, on parle alors de *confinement magnétique*. Pour que le combustible, à l'état de plasma, puisse produire suffisamment de réactions thermonucléaires, il faut le maintenir dans un volume limité et l'éloigner de toute paroi matérielle afin de maintenir sa température élevée : c'est le confinement.

Dans un plasma à l'état libre, la trajectoire des particules est aléatoire et les particules vont s'échapper. Comme le plasma est formé de particules chargées, les champs magnétiques intenses peuvent interagir sur celles-ci. Si ce même plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne les particules s'enroulent autour des lignes de champ et ne peuvent plus atteindre les parois latérales. Afin d'éviter les pertes aux extrémités, on referme la boîte magnétique en créant un tore. Le champ magnétique ainsi créé par une série d'aimants supraconducteurs entourant le plasma s'appelle le champ magnétique toroïdal. Les aimants générant ce champ sont les aimants toroïdaux.

Bibliographie

1. PHYSIQUE DE L'ETAT SOLIDE

Charles Kittel - Sciences Sup - Dunod (8^{ème} édition)

2. LES DEFIS DU CEA