



Filière : SMP -- Semestre : VI

Module : Physique des Matériaux II

***Chapitre 5 : Propriétés électriques, magnétiques,
supraconductivité***

Pr Khechoubi El Mostafa

khechoubi@umi.ac.ma

Année universitaire 2024/2025



Chapitre1 : Théorie des bandes – Mouvement des électrons dans un cristal

Chapitre2 : Application – Physique des Semi-conducteurs

Chapitre3 : Vibration des Phonons

Chapitre4 : Défauts dans les cristaux

Chapitre5 : Propriétés électriques, magnétiques, supraconductivité

Chapitre6 : Propriétés optiques des matériaux

Les matériaux sont classés comme

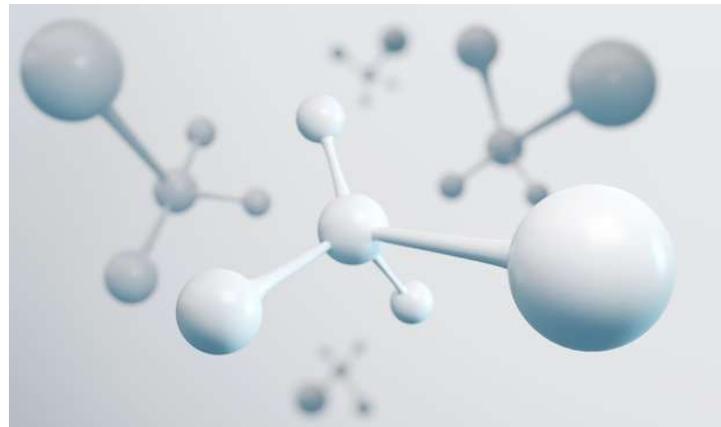
Conducteurs

Semi conducteur

Isolants

en fonction de leurs propriétés de conduction électrique

Chaque matériau est composé de molécules qui à leur tour sont constituées d'atomes



Lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique, ces atomes du matériau subissent certains déplacements et changements de propriétés

En octobre 1745, une expérience faite par ***Ewald Georg von Kleist de l'Allemagne*** en connectant un générateur électrostatique haute tension à un volume d'eau, recueilli dans un pot à main, à l'aide d'un fil a montré que la charge électrique peut être stockée.

Bouteille de Leyde



En utilisant ce phénomène, ***Pieter van Musschenbroek*** a inventé le premier condensateur appelé «Leyden Jar». La nouvelle « propriété matérielle » mise en évidence par cette invention était «***diélectrique***».

Matériaux diélectriques

Milieux conducteurs ou semi conducteurs

Existence de porteurs de charges libres susceptibles de se mouvoir dans la masse du matériau

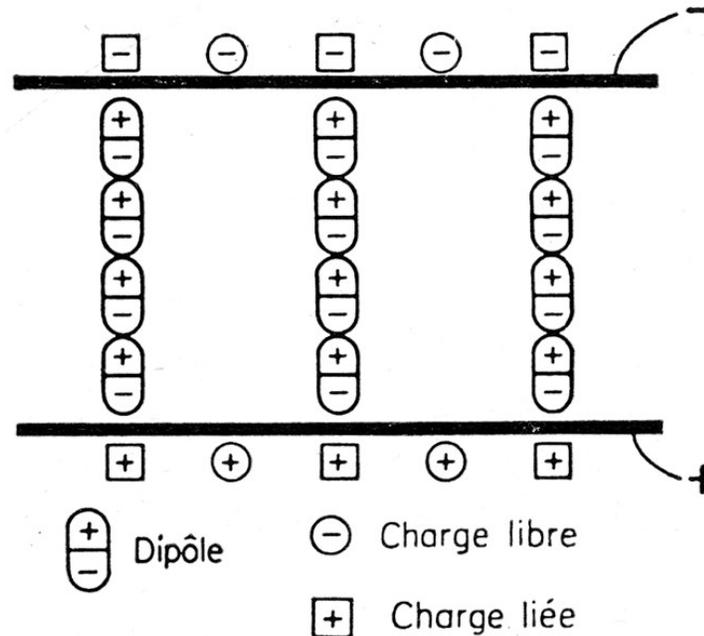
Électrons pour les métaux, électrons ou trous pour les semi-conducteurs

Contrairement au cas des conducteurs, le champ électrique pénètre à l'intérieur du matériau isolant et agit sur les porteurs de charges de la matière

Il faut noter que les porteurs de charges, électrons ou ions, ne sont pas libres, ils restent attachés à des groupements atomiques, moléculaires ou cristallins, d'où leur nom de « charges liées »

Chaque matériau est composé d'atomes. Les atomes contiennent à la fois des particules chargées négativement et positivement

Le noyau central de l'atome est chargé positivement. Dans n'importe quel matériau, les atomes sont disposés comme dipôles représenté avec une charge positive et négative à son extrémité



Lorsque ces matériaux sont soumis à un champ électrique, un moment dipolaire a lieu



Les électrons présents dans un milieu diélectriques ne peuvent pas, par définition, se déplacer sur des grandes distances.

Ils peuvent par contre présenter des mouvements d'amplitude très petite à notre échelle, mais qui peuvent être à l'origine de nombreux phénomènes.

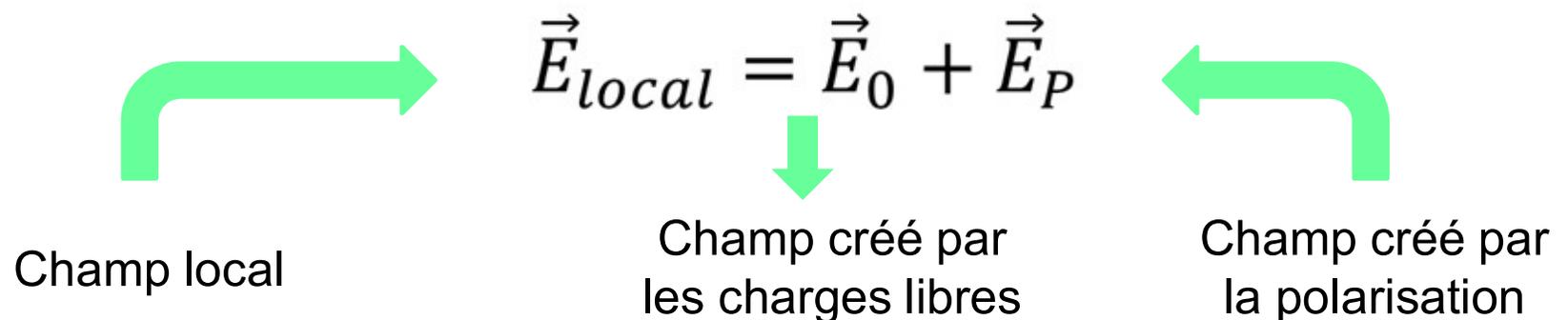
Ces mouvements sont souvent des mouvements d'oscillation autour du noyau : le nuage électronique peut être déformé et ainsi créer un dipôle électrostatique.

Il en va de même pour le déplacement global des atomes au sein du matériau (ils créent également des dipôles).

En soumettant le matériau à un champ électrique de tels dipôles peuvent être créés. S'ils existaient déjà, cela peut avoir comme effet de tous les aligner dans le même sens.

D'un point de vue microscopique, on peut relier l'amplitude de l'onde au dipôle créé via la notion de « **polarisabilité** », qui est une caractéristique propre à chaque atome.

Soit un milieu diélectrique soumis à l'action du champ électrique créé par une distribution de charges libres



Atomes, molécules et polarisabilité électronique

Cas d'un atome isolé

Moment dipolaire induit : $\vec{p} = \alpha_e \epsilon_0 \vec{E}$

Polarisabilité électronique $\alpha_e = \frac{e^2}{m \epsilon_0} \sum_n \eta^2 \frac{f_n}{(E_n - E_0)^2}$

E_0 : énergie du niveau fondamental de l'atome

E_n : énergie d'un état excité n

f_n : nombre réel sans dimensions appelé « force d'oscillation »

Cas d'une molécule

Certaines molécules en absence de champ électrique ne possèdent pas de moment dipolaire électrique permanent

« *molécules non polaires* »

L'application d'un champ électrique provoque une distorsion du nuage électronique, induisant ainsi un moment dipolaire caractérisé par une

« *polarisabilité électronique* »

De plus les positions relatives des noyaux à l'intérieur de la molécule peuvent aussi être modifiées, apportant alors une contribution d'un type différent au moment dipolaire

« *polarisabilité atomique ou ionique* »

$$\vec{p} = \varepsilon_0 (\alpha_e + \alpha_a) \vec{E} = \varepsilon_0 \alpha \vec{E}$$

Il est cependant impossible de mesurer de telles grandeurs microscopiques.

On préfère utiliser une grandeur macroscopique, la polarisation, qui vaut la somme de tous les dipôles du matériau. Cette polarisation vient donc de différents effets physiques :

Polarisation électronique

Toujours présente, est due au déplacement et à la déformation de chaque nuage électronique

Polarisation atomique

est due aux déplacements des atomes

Polarisation d'orientation

existe lorsque des dipôles déjà présents sont tous alignés entre eux

Susceptibilité électrique

En électromagnétisme, la susceptibilité électrique est une grandeur caractérisant la polarisation créée par un champ électrique.

La Susceptibilité est donnée par la relation de Langevin—Debye

$$\chi = \varepsilon_r - 1 = N \left(\alpha_e + \alpha_a + \frac{p^2}{3\varepsilon_0 kT} \right)$$

N : densité atomique ou moléculaires par unité de volume

l'intensité du champ électrique utilisé est suffisamment faible pour que la polarisation vérifie la relation suivante :

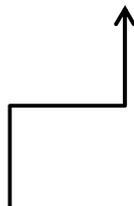
$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}$$



Dans la plupart des cas, plusieurs phénomènes sont présents et se cumulent. La principale difficulté du calcul réside dans le fait que le champ électrique macroscopique dans lequel est plongé le matériau est souvent différent du champ électrique local qui agit réellement sur les constituants microscopiques et donc crée la polarisation.

C'est pourquoi il faut distinguer la susceptibilité de la polarisabilité microscopique

$$\vec{p} = \epsilon_0 \alpha \vec{E}$$



Moment dipolaire

Grandeur microscopique

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$$



Polarisation

Grandeur macroscopique

la susceptibilité électrique est un nombre complexe sans dimension

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}$$

Ce cas est dit linéaire car il s'agit d'une relation de proportionnalité

Il permet d'interpréter le phénomène de réfraction

En effet, la susceptibilité est reliée, d'après les équations de Maxwell, à l'**indice de réfraction** « *n* » par la relation :

$$n = \sqrt{1 + \text{Re}(\chi)}$$

Calcul de la susceptibilité électrique

Pour calculer la susceptibilité électrique, plusieurs approches sont possibles. Il faut dans tous les cas être capable de décrire l'effet d'un champ électrique sur les constituants de la matière. Les différents mécanismes possibles sont à l'origine de plusieurs types de polarisation.

Polarisation électronique, toujours présente, due au déplacement et à la déformation du nuage électronique

Polarisation atomique ou ionique due aux déplacements des atomes ou des ions dans la structure du matériau

Polarisation d'orientation, pour les matériaux qui sont initialement polarisés de façon microscopique, mais dont les éléments n'ont pas forcément la même orientation,

Polarisation macroscopique due à des déplacements de charges dans l'ensemble du matériau.



Dans la plupart des cas, plusieurs de ces phénomènes sont présents et se cumulent. La principale difficulté du calcul réside dans le fait que le champ électrique macroscopique dans lequel est plongé le matériau est souvent différent du champ électrique local qui agit réellement sur les constituants microscopiques et donc crée la polarisation. C'est pourquoi il faut distinguer susceptibilité (grandeur macroscopique) de polarisabilité (grandeur microscopique).

Structure cristalline et propriétés diélectriques

Piézoélectricité

Propriétés de certains cristaux d'acquérir une polarisation (ou de la modifier) sous l'effet d'efforts mécaniques, tels que compressions ou tractions

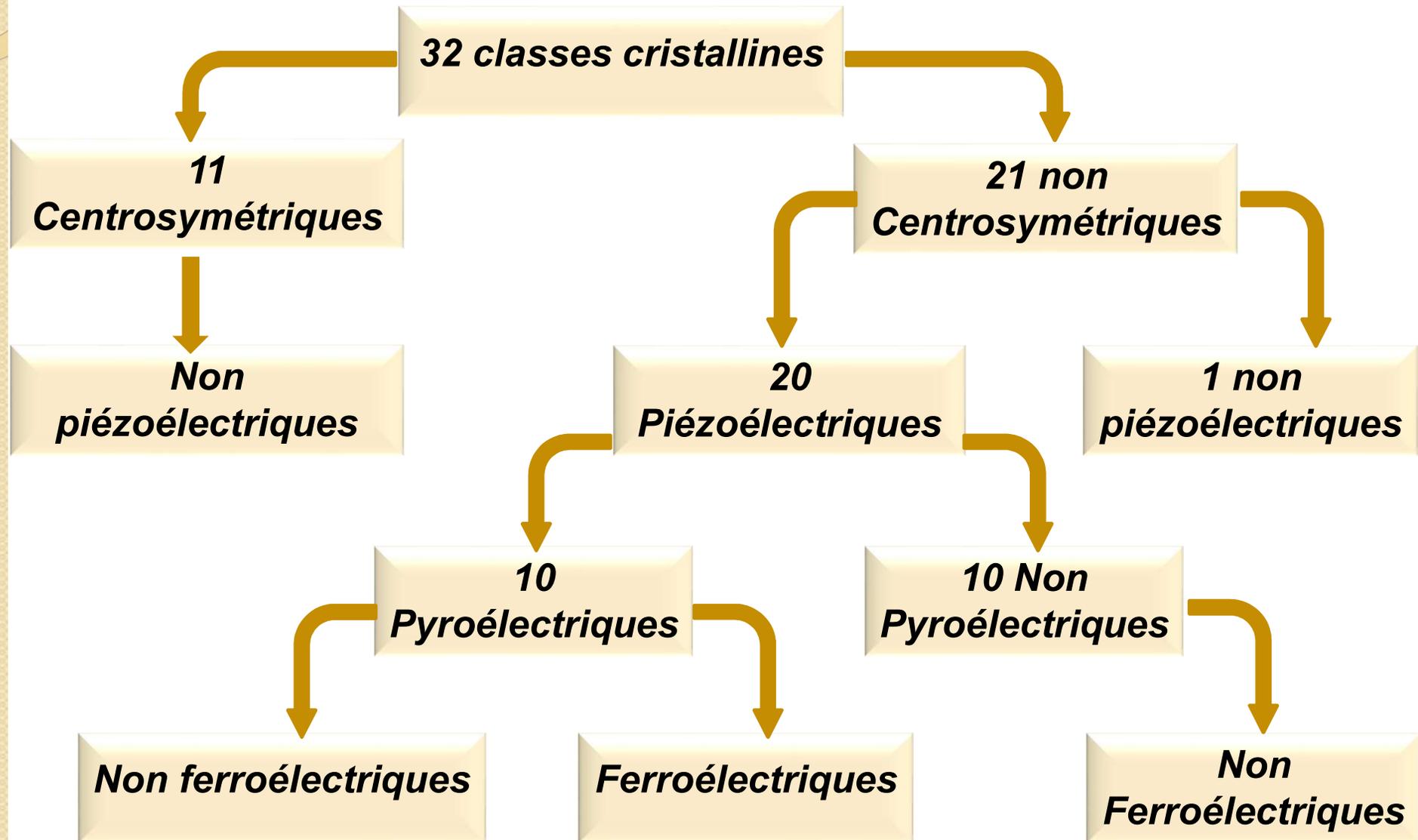
Pyroélectricité

Parmi les cristaux piézoélectriques une famille de cristaux présente une polarisation spontanée le long d'un axe privilégié

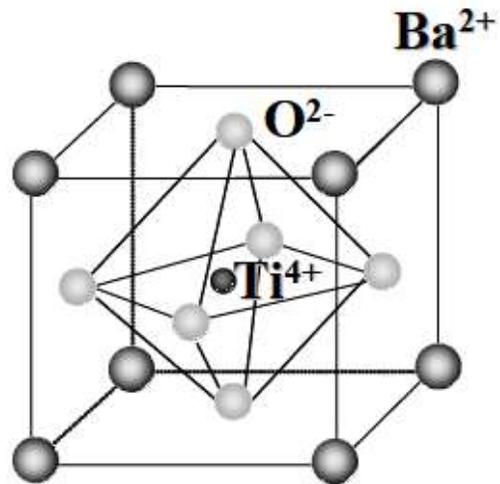
Cette polarisation spontanée dépend de la température. Il suffit alors de faire varier la température pour modifier la polarisation, ce qui permet de la mettre en évidence. C'est le phénomène de pyroélectricité

Ferroélectricité

Parmi les cristaux pyroélectriques un sous-groupe présente la particularité qu'un champ électrique appliqué peut modifier et renverser le sens de cette polarisation : ce sont les cristaux ferroélectriques



Les matériaux ferroélectriques, en particulier les dérivés du titanate de baryum BaTiO_3 , sont utilisés dans l'industrie de la microélectronique depuis plusieurs années sous la forme de céramiques massives ou de monocristaux



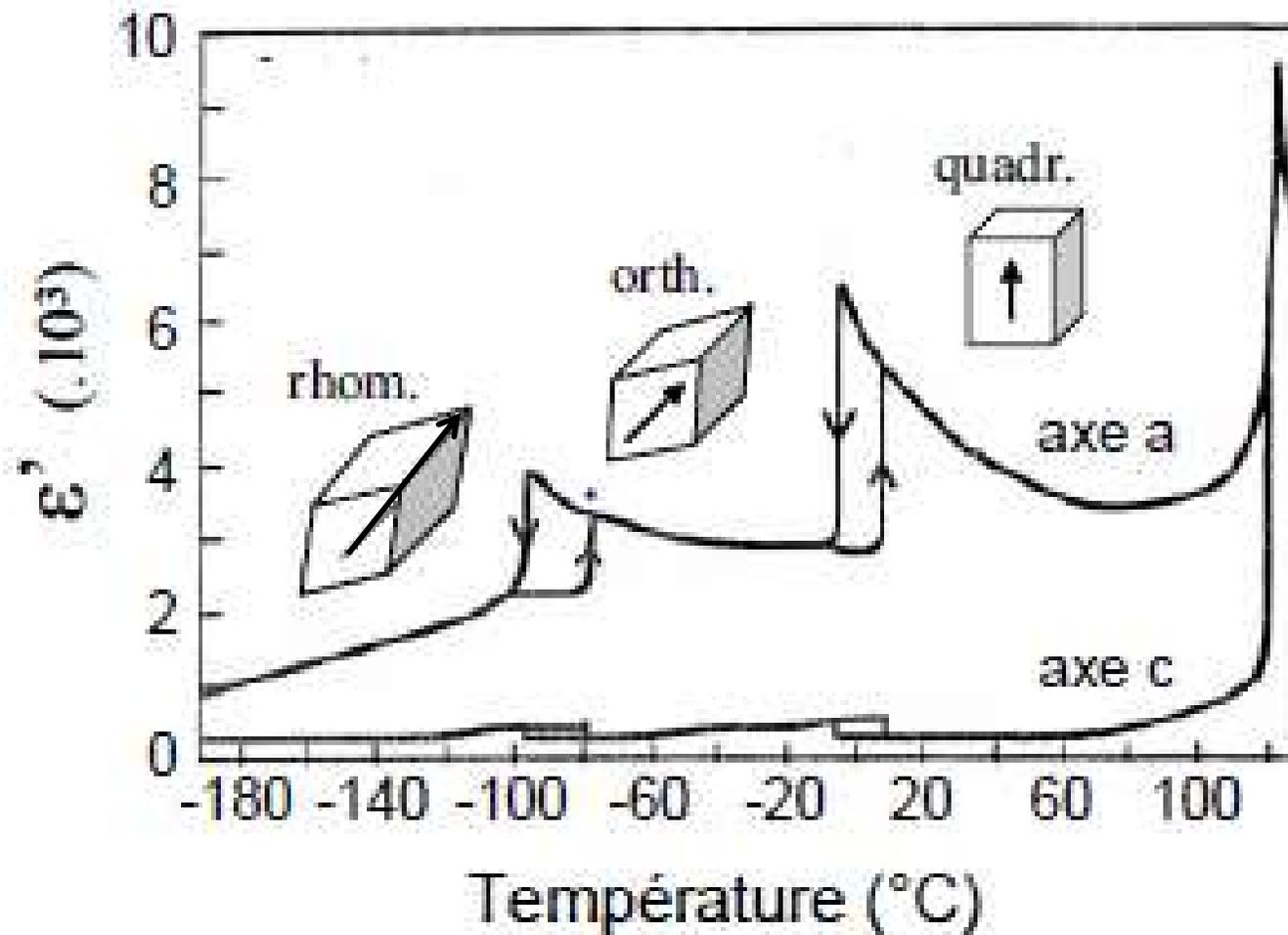
Une permittivité diélectrique très élevée, ainsi que des propriétés piezo- et pyroélectriques remarquables ont en effet permis leur développement en tant que matériaux pour condensateurs, actionneurs et capteurs.

La course à la miniaturisation des composants électroniques a ensuite naturellement conduit à l'essor des techniques de synthèse des matériaux ferroélectriques en couches minces de quelques nm à quelques μm d'épaisseur.

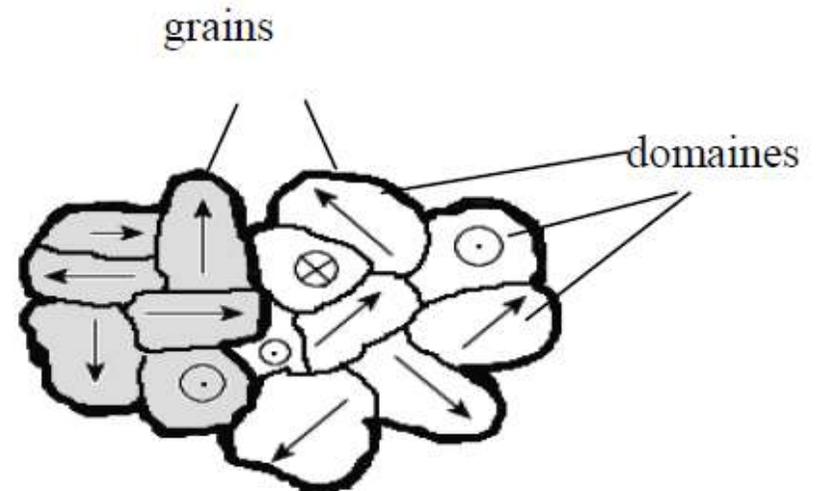
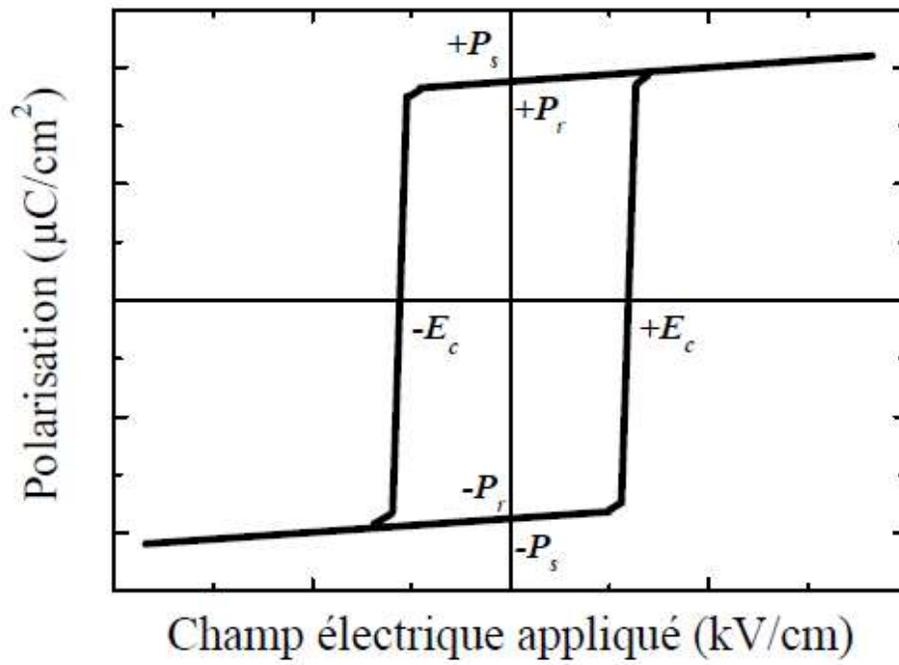
Pour les ferroélectriques, la susceptibilité croît quand la température décroît. Au-dessus de T_c , la susceptibilité diélectrique suit une loi de type **Curie-Weiss** :

$$\chi \approx \frac{C}{T - T_c}$$





Evolution de la permittivité d'un monocristal de BaTiO₃ en fonction de la température selon les axes a et c



Matériaux magnétiques

Les pierres magnétiques sont connues depuis l'antiquité. Elles ont été utilisées très tôt par les marins comme boussole.

Quelques repères

Avant 1600, Gilbert effectue des recherches sur le magnétisme terrestre et émet l'hypothèse que la terre est un aimant géant.

1819, Oersted observe que des fils conducteurs parcourus par un courant électrique créent un champ magnétique.

1820, Biot et Savart puis Ampère établissent des relations expérimentales sur le champ magnétique et sa production par des courants électriques.

Notion de dipôle magnétique

Du point de vue de la réactivité à un champ électrique on distingue deux grands types de milieux

Les conducteurs (éventuellement les SC) qui réagissent en créant un courant électrique

Les isolants ou diélectriques qui réagissent en se polarisant

Par contre tous les milieux ont un comportement semblable en présence d'un champ magnétique

Ils s'aimantent

On distingue néanmoins

Ceux qui possèdent un moment magnétique propre susceptible de s'orienter dans un champ magnétique extérieur et qui donnent lieu aux phénomènes de

Paramagnétisme

Ferromagnétisme

Ceux qui n'en possèdent pas. Dans ces derniers, à cause des phénomènes d'induction, le champ magnétique entraîne la création d'un moment magnétique opposé au champ. C'est l'origine du

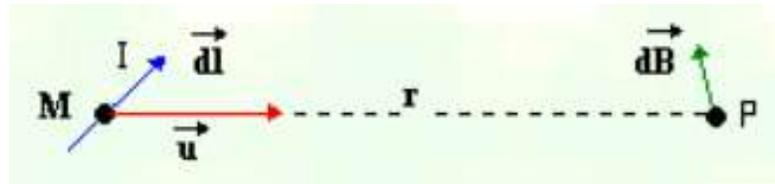
Diamagnétisme

L'ensemble des phénomènes physiques liés au magnétisme repose sur la notion

Dipôle magnétique

Induction magnétique B

l'induction magnétique créée par une distribution de courant est donnée par la **loi de Biot et Savart**



$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} dl \wedge \vec{u}$$

on définit parfois le vecteur $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$

Lorsque la distribution de courant est localisée

le champ qu'elle produit à grande distance

de même que les actions mécaniques qu'elle subit

peuvent être décrits par une quantité vectorielle

Moment magnétique

$$\vec{m} = \frac{1}{2} \int \vec{r} \wedge \vec{J}(r) d^3r$$

Les propriétés magnétiques de la matière s'expliquent par la présence de courants microscopiques dans la matière, liés au mouvement des électrons autour du noyau, et au moment magnétique propre d'un électron

Un moment magnétique est **induit** s'il est créé par la présence de \vec{B}

Un moment magnétique induit est toujours opposé au champ \vec{B} qui l'a créé

Certains atomes (ou molécules) portent des moments magnétiques même si le champ magnétique est nulle

on dit qu'ils portent un **moment magnétique permanent**

Actions mécaniques subies par un dipôle

On définit un autre vecteur qui est le potentiel vecteur \vec{A}

Le potentiel vecteur créé par une distribution de courant dont le moment magnétique

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{m} \wedge \vec{r}}{r^3} \qquad \vec{B} = \overrightarrow{rot(\vec{A})}$$

Relation dans le vide

Relation dans un matériau

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

Perméabilité du vide



$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Perméabilité du
matériau



L'induction magnétique peut s'écrire d'une autre façon pour montrer la contribution du matériau à l'induction

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

M : Magnétisation du matériau

Elle représente le champ magnétique induit associé avec le matériau

On définit d'autres paramètres

Perméabilité relative du matériau

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$\mu_r = 1 + \chi$$

Susceptibilité magnétique

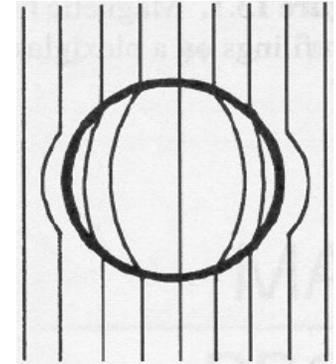
$$\chi = \frac{M}{H}$$

Le signe et la valeur de χ permettent de classer les matériaux en différentes catégories

Diamagnétique $\chi < 0$ petite

Indépendante du champ extérieur

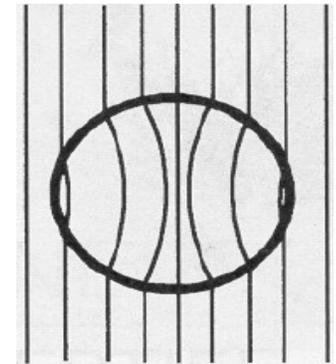
Le matériau est expulsé du champ extérieur



Paramagnétique $\chi > 0$ petite

Indépendante du champ extérieur

Le matériau est légèrement attiré vers champ extérieur



Ferromagnétique

Anti-Ferro

Ferrimagnétique

$\chi > 0$

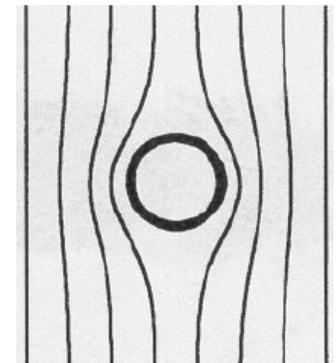
très grande

grande

très grande

Indépendante du champ extérieur

Le matériau est très fortement attiré vers champ extérieur



Magnétisme de spin et magnétisme orbital

Le spin et le mouvement orbital des électrons engendrent

des moments magnétiques dus au spin $+\mu_B$ ou $-\mu_B$

des moments magnétiques orbitaux $m\mu_B$ m : nombre quantique magnétique

Matériau Diamagnétique

Tous les électrons sont appariés (il n'y a pas d'électrons célibataires). Le moment magnétique total est nul.

Le champ magnétique appliqué provoque une déformation des orbitales de manière que la circulation des électrons crée un champ magnétique qui s'oppose au champ extérieur.

Ceci diminue le champ magnétique à l'intérieur du matériau

Matériau Paramagnétique

Il y a des électrons non appariés et le moment magnétique total n'est pas nul

Sous l'effet du champ magnétique appliqué, ces moments magnétiques élémentaires de spin et d'orbital, tendent à s'aligner avec le champ extérieur. Ce qui augmente l'intensité du champ à l'intérieur du matériau.

Le paramagnétisme est déterminé par les propriétés des atomes individuels 30

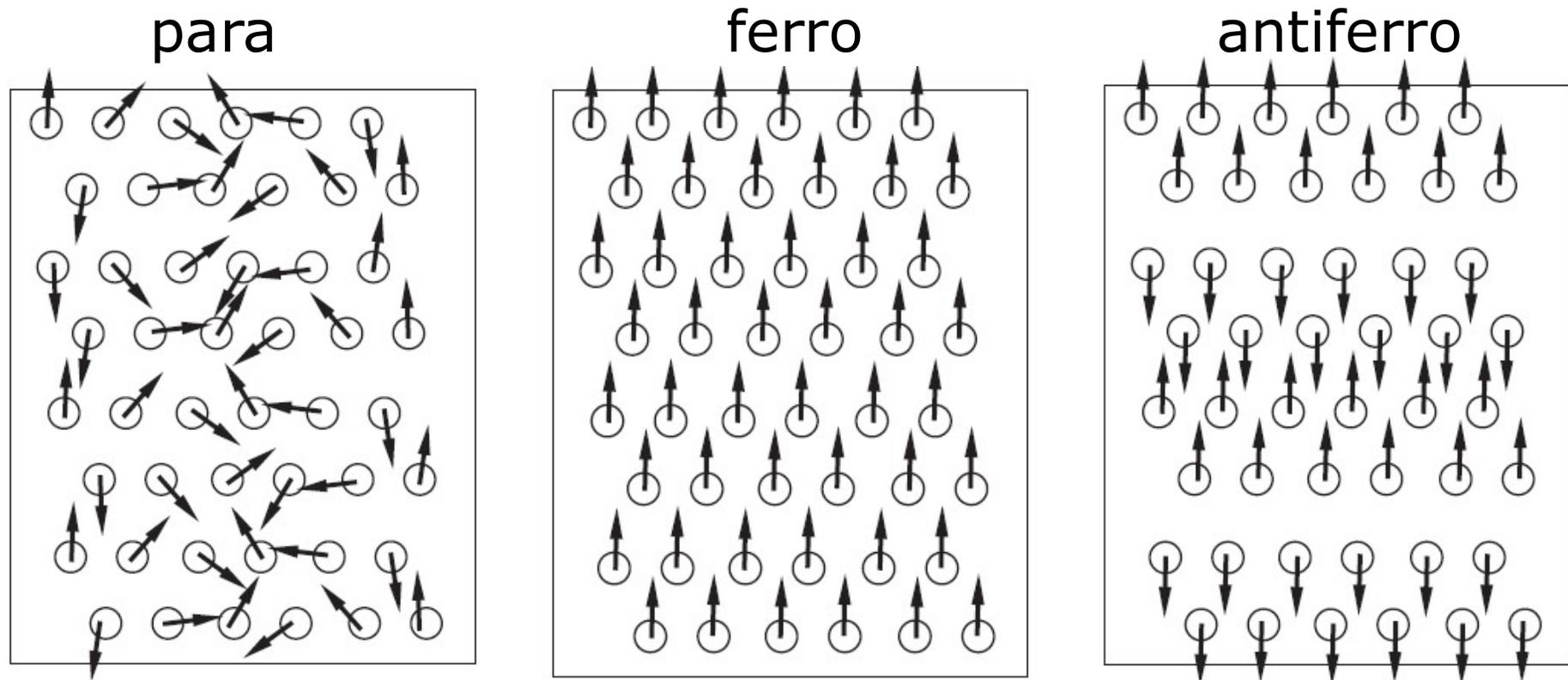
Matériau Ferromagnétique

L'interaction coopérative entre les moments magnétiques des atomes individuels est à l'origine d'une attraction forte

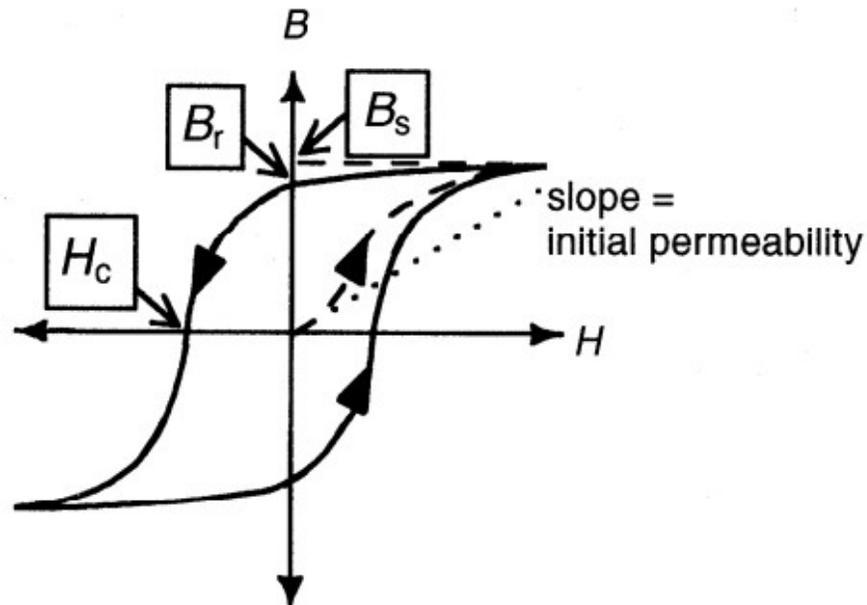
D'un point de vue thermodynamique, il y a une compétition entre

une interaction d'échange qui tend à garder les spins parallèles

une interaction de dipôles magnétiques qui favorise l'alignement antiparallèle des spins



Pour les matériaux ferromagnétiques, après la première magnétisation atteignant la valeur maximale B_s , une boucle d'hystérésis est observée en variant le champ extérieur alternativement entre $+H$ et $-H$



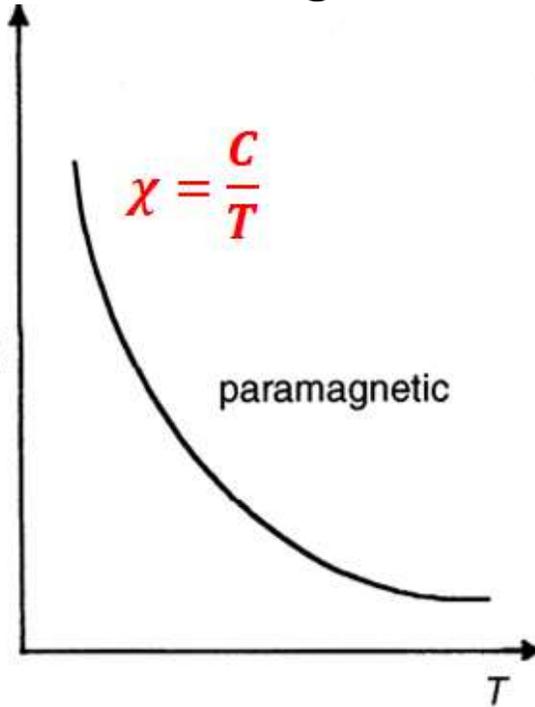
B_s : Induction de saturation qui correspond à un seul domaine ferromagnétique

B_r : Induction rémanente Induction persistante même en absence de champ

H_c : Champ coercitif Champ à appliquer pour annuler l'induction

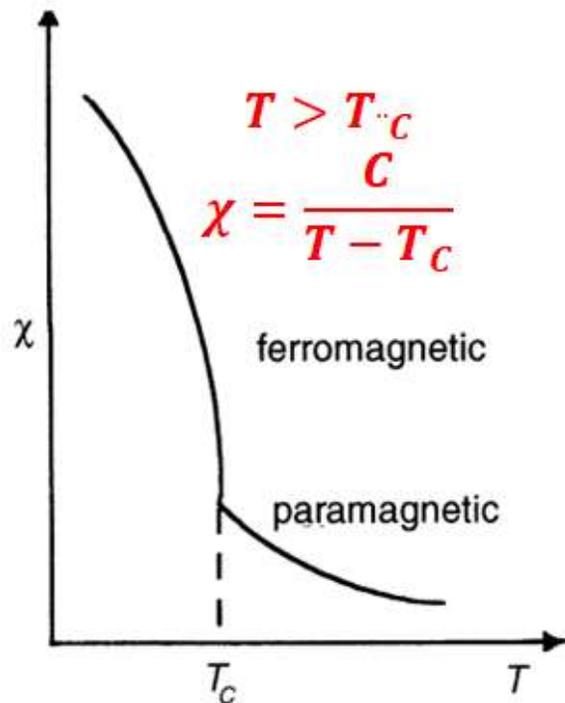
Dépendance en température de la magnétisation

χ diminue avec l'augmentation de T à cause de l'agitation thermique qui réduit l'alignement des moments magnétiques dans les domaines. Au-dessus de T_C , l'énergie thermique est suffisante pour détruire l'alignement coopératif



χ diminue avec l'augmentation de T à cause de l'agitation thermique qui réduit l'alignement des moments magnétiques (individuels) le long du champ extérieur

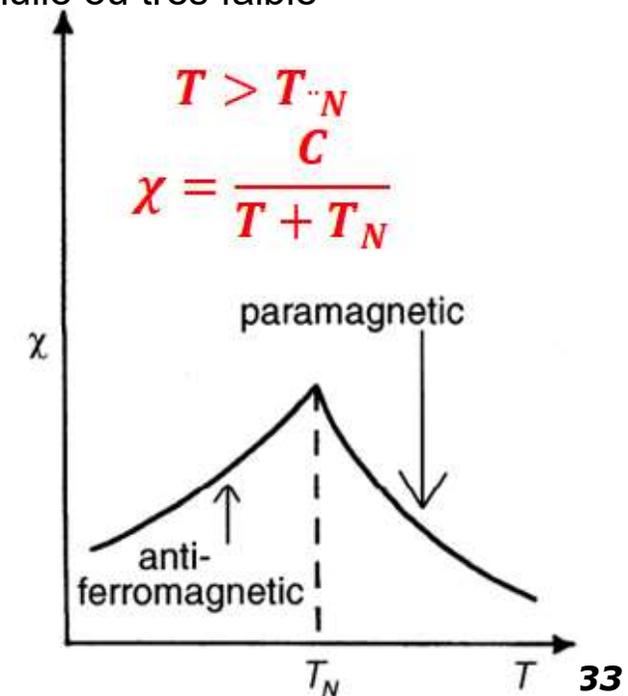
Dans un matériau anti-ferromagnétique, les moments magnétiques de spin dans les couches adjacentes ont la même intensité et s'orientent de façon antiparallèle, ce qui donne une χ nulle ou très faible



C : Constante de Cuire

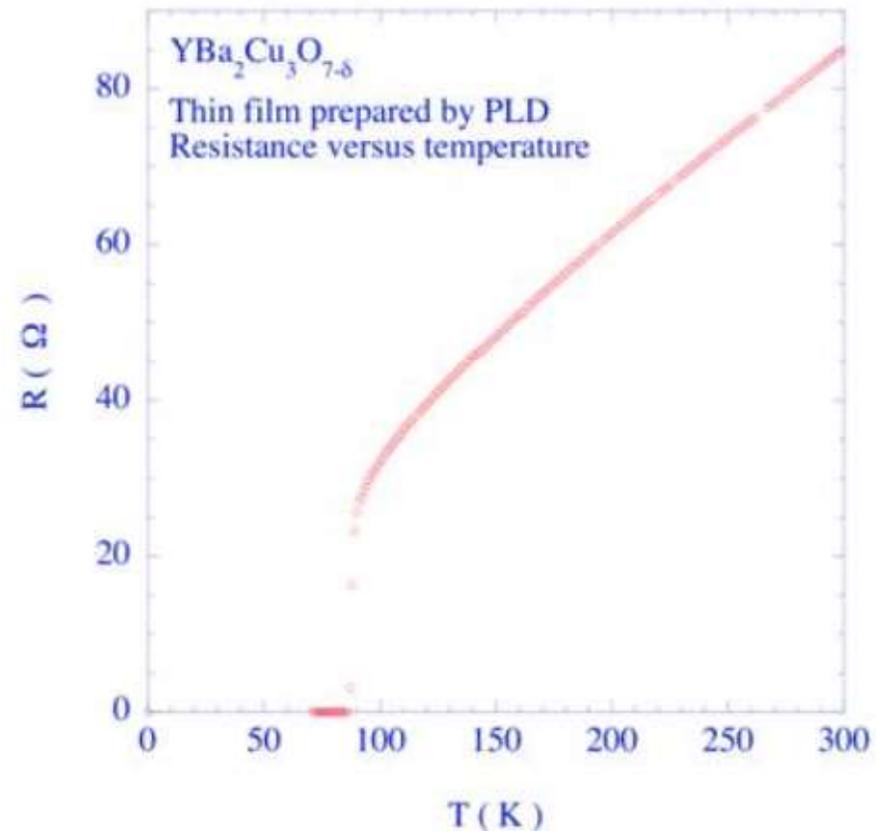
T_C : Température de Cuire

T_N : Température de Néel



Matériaux Supraconducteurs

La supraconductivité est le phénomène par lequel un matériau, habituellement un métal, perd toute résistivité électrique en dessous d'une certaine « température critique » : **T_c** .



En même temps, le supraconducteur exclura tout champ électromagnétique de son intérieur, mis à part une fine couche surfacique : **phénomène appelé effet Meissner.**



On distingue les supraconducteurs

de **première espèce**, dans lesquels la disparition de l'effet Meissner signale le retour à l'état métallique normal,

des supraconducteurs de **type II**, dans lesquels l'état sans champ électromagnétique (l'état Meissner) est séparé de l'état normal par une phase mixte, dans laquelle le supraconducteur est traversé par des lignes de flux magnétique quantifié, ou vortex.



