

La matière et le froid (2)

- Phases et transitions de phases
- Électricité, magnétisme et supraconductivité

Julien Ramonet, mars 2025

Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées
Images : Wikipedia sauf mention contraire

Notions utilisées :

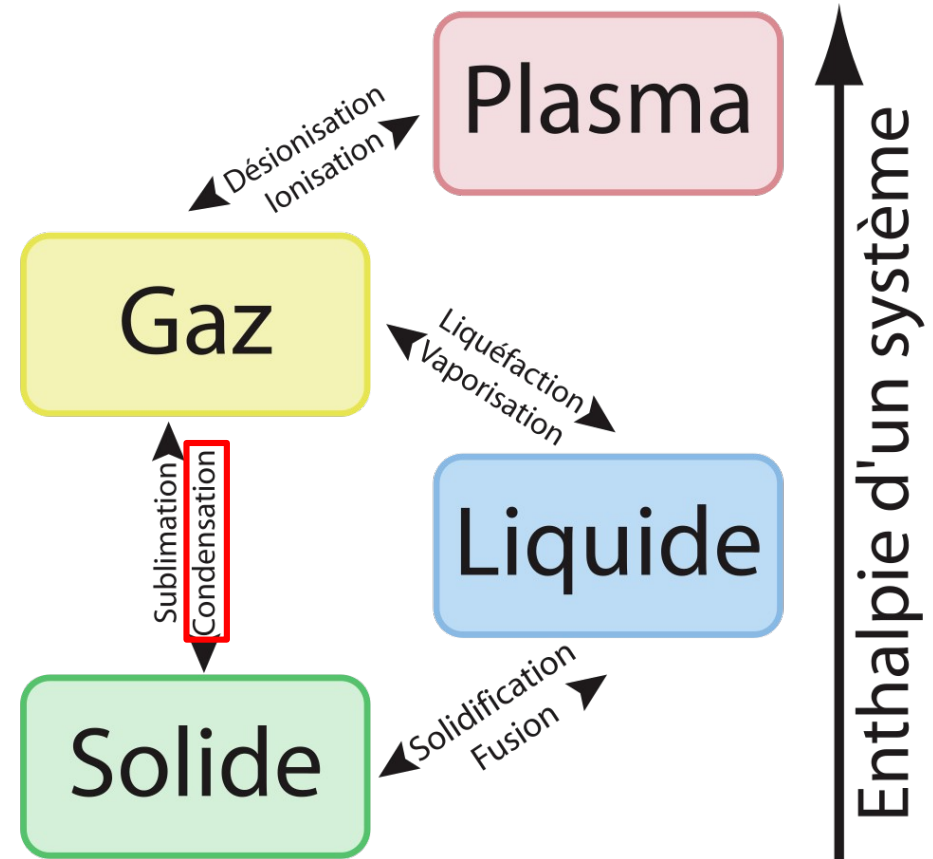
1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
31. Matière et rayonnement – théorie
45. La matière et le froid (1)

Transition de phase

- = changement de phase d'un système physique en raison d'une variation de température, de pression, d'excitation magnétique, ... = **changement des propriétés** du système
- Exemples :
 - Changements d'état
 - Changement des propriétés magnétiques
 - Supraconductivité, superfluidité
 - Condensation de Bose-Einstein

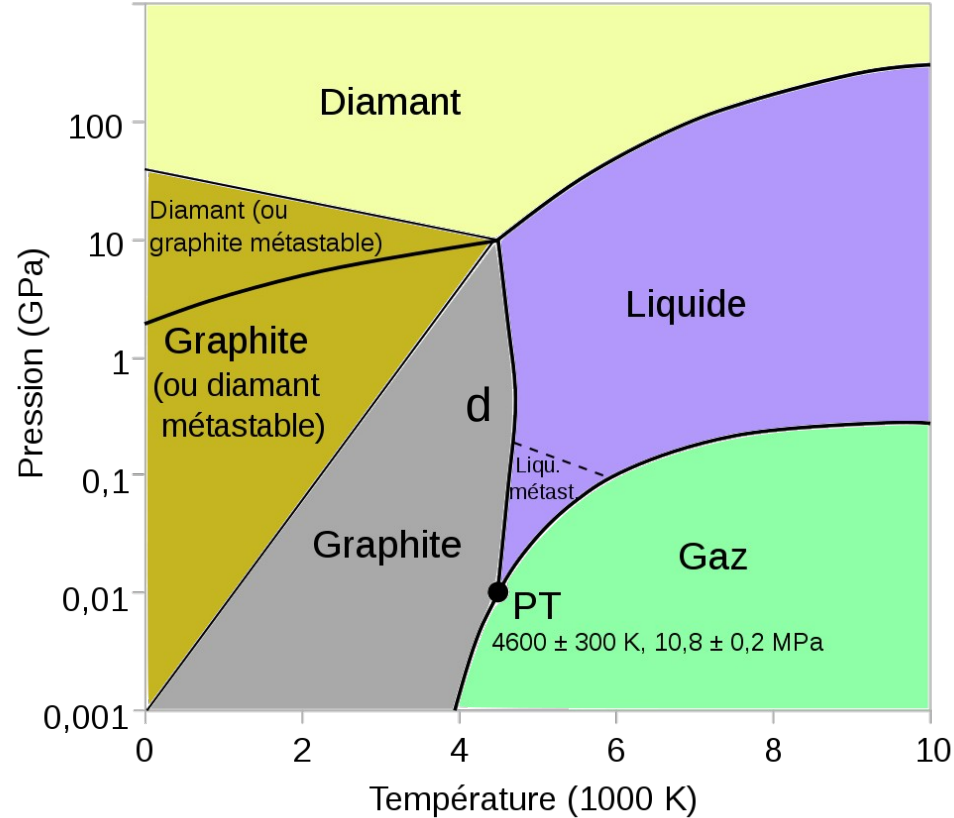
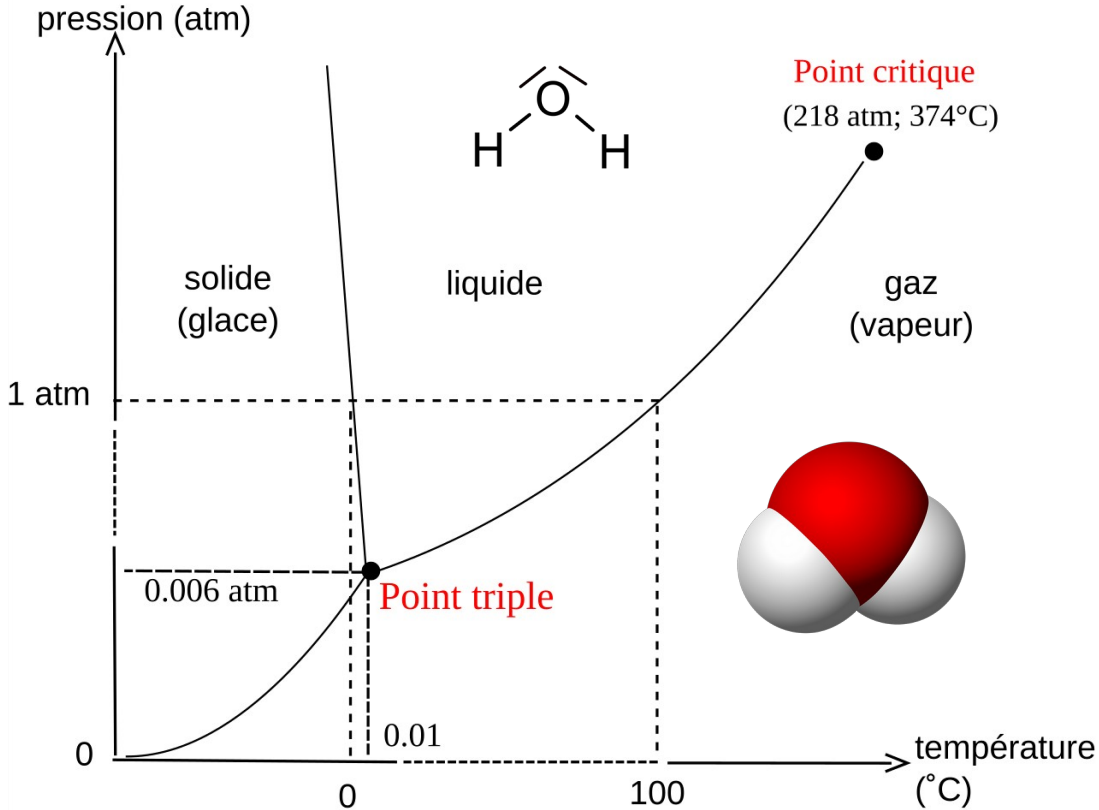
Étude mécanique et physique de froissement et dé-froissement des textiles cellulosiques à base de coton et lin

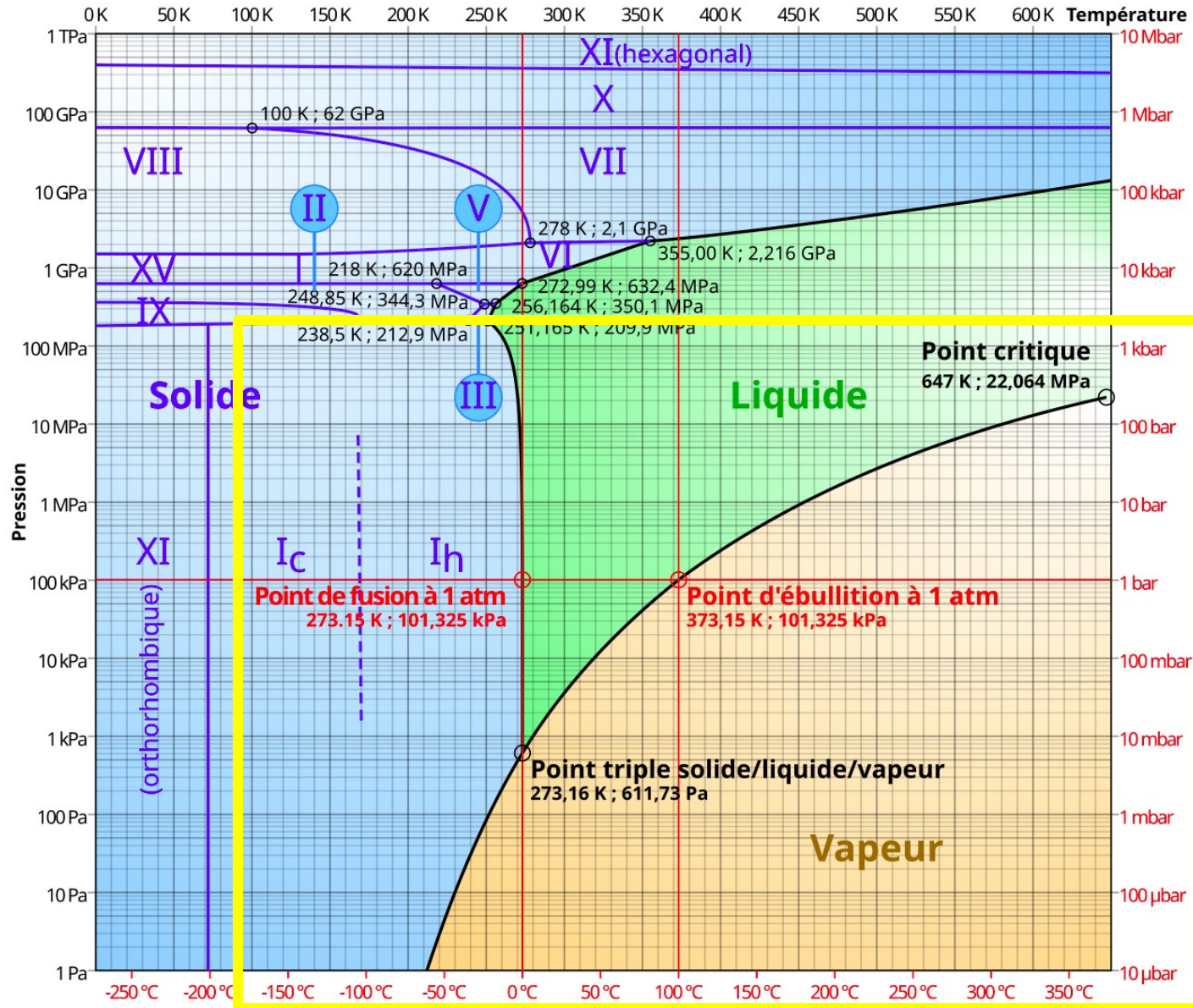
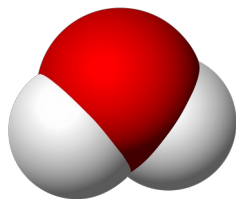
Lina Ben Hassine



Les diagrammes de phase

Diagramme indiquant les différentes phases d'un corps physique, en général dans un diagramme (p, T)





Note : échelle logarithmique de pression

La supraconductivité



Ce train « SCMaglev » lévite au-dessus des rails grâce à des bobines supraconductrices. Depuis 2015, il détient le record de vitesse avec 603 km/h (TGV : 575 km/h en 2007)

Le courant électrique

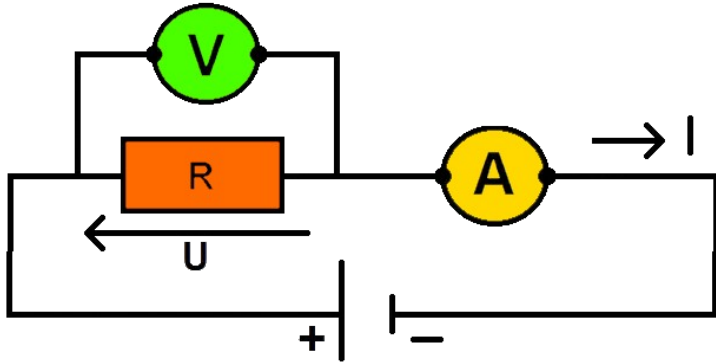
- Lorsqu'on soumet des électrons mobiles à une **différence de potentiel électrique** U , ils se **déplacent**

= un **courant électrique** d'intensité $I = U/R$ (« loi d'Ohm »), où R est la **résistance électrique** du circuit

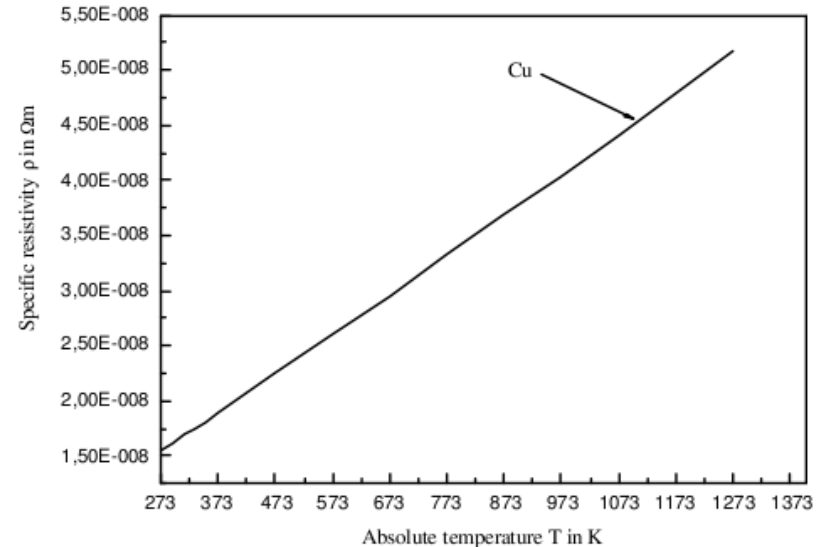
- La résistance est due aux **chocs des électrons lors de leur parcours**

→ échauffement = **effet Joule**

- La résistance dépend du **matériau** et de sa **forme**
- La **résistivité** ρ ne dépend que du **matériau**

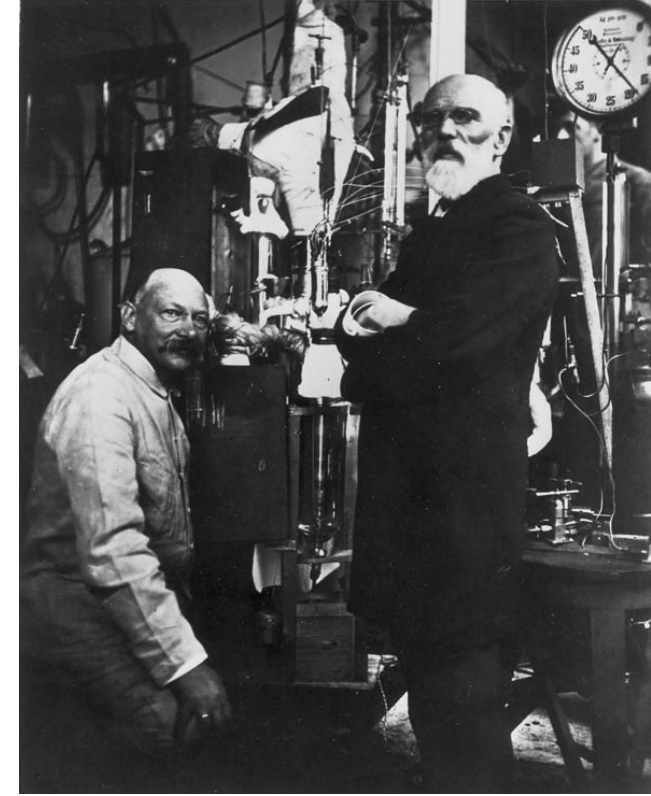
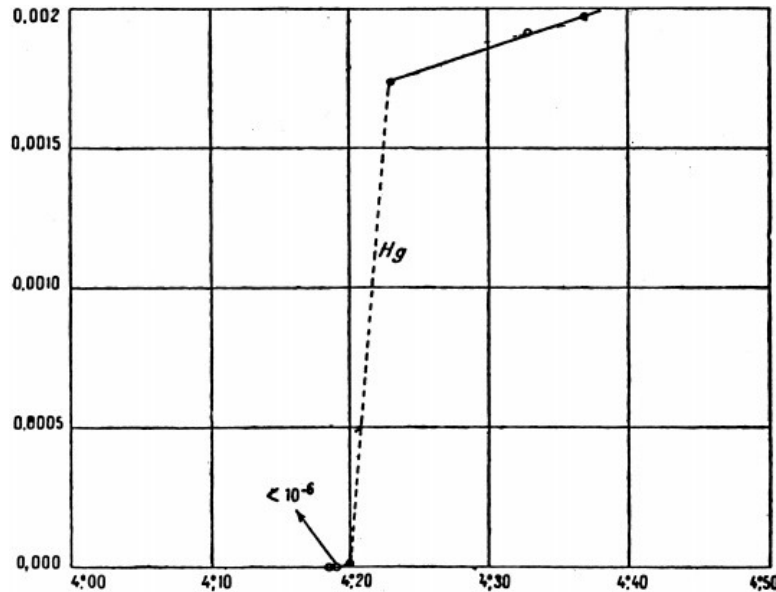


- Plus ρ est grande, plus le courant a « du mal à passer »
 - Selon la valeur de ρ , on parle de **conducteur**, de **semi-conducteur** ou d'**isolant**
 - Les **métaux** sont les meilleurs conducteurs : $Ag > Cu > Au > Al, \dots$
- La résistivité **diminue avec la température** (ce qui est logique car l'agitation thermique également)
- La vitesse de déplacement des électrons est de l'ordre de **quelques mm/s**
 - (Mais l'information se propage à c)



Résistivité à très basse T_p

- Après avoir réussi à liquéfier de l'hélium, Kamerlingh Onnes a étudié les propriétés de la matière à **très basse température**
- Il découvre en 1911 que la résistivité électrique du mercure **devient nulle à 4,2 K !**

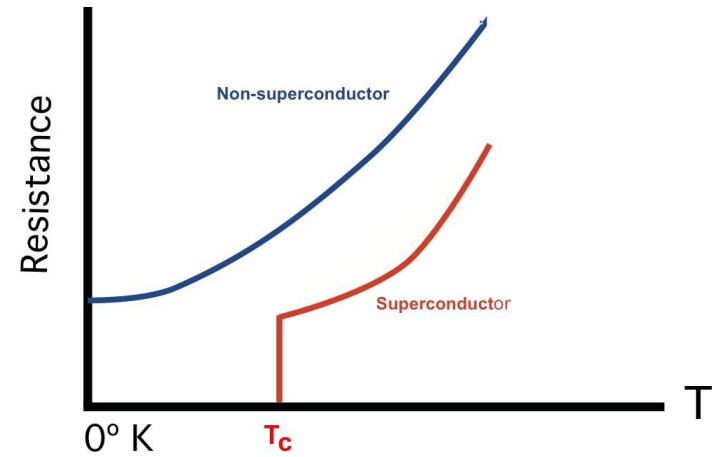


Kamerlingh Onnes et van der Waals, 1911

Prix Nobel de Physique 1913 pour « ses études des propriétés de la matière à basse température, ce qui a mené, entre autres, à la production de l'hélium liquide »

La supraconductivité

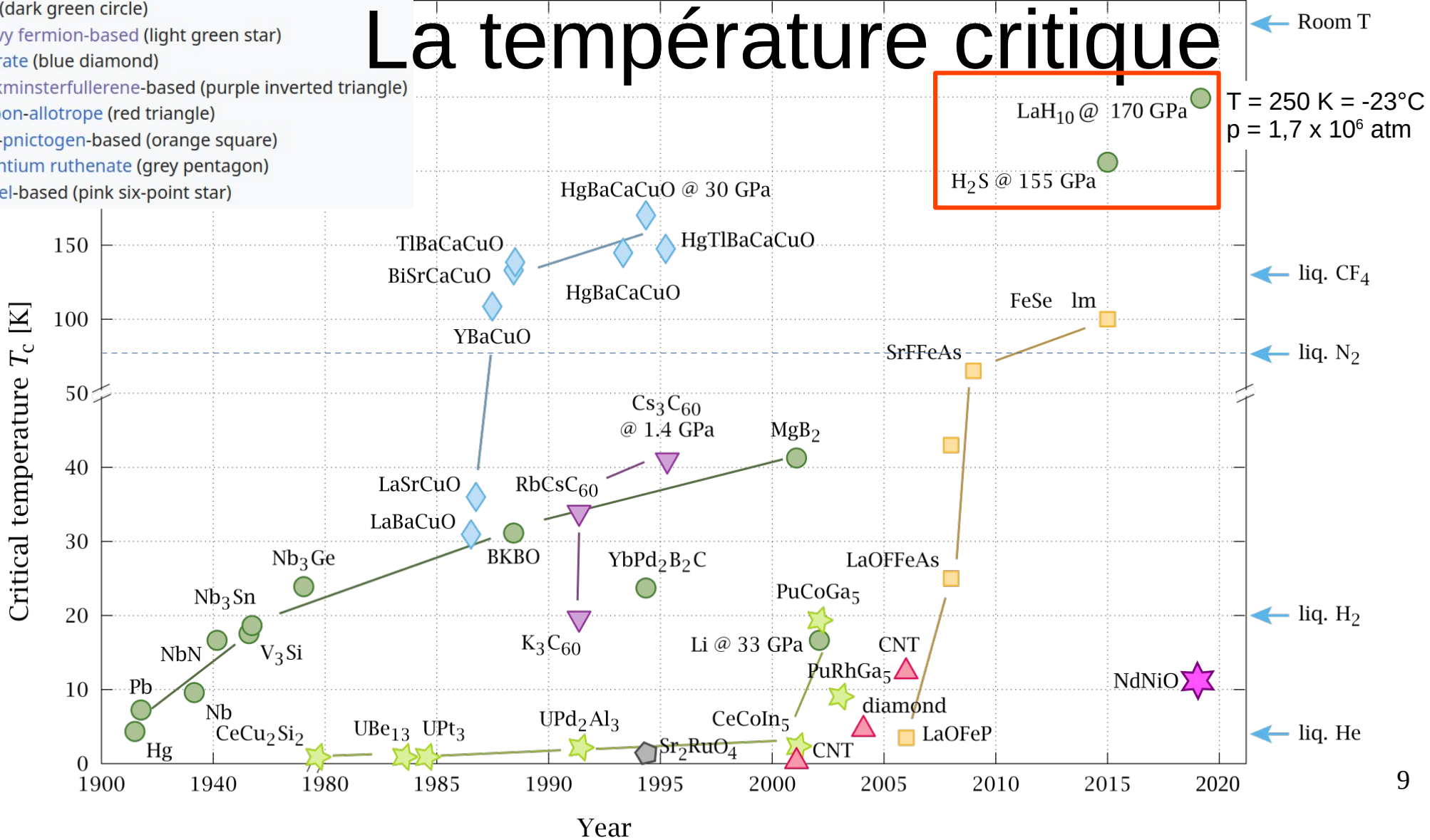
- **Disparition de la résistance électrique** d'un matériau, qui devient « **supraconducteur** »
- Cet effet se produit **en-dessous d'une température « critique »** propre au matériau
 - Mais tous les matériaux ne possèdent pas cette propriété → résistivité non nulle à 0 K
 - Si $R=0$, un courant tourne **indéfiniment** dans un circuit supraconducteur : plus d'effet Joule et de dissipation
- Transition supraconductrice = **véritable transition de phase**
- Recherche très active pour des « supraconducteurs à haute température critique » (découverte en 1986)
 - 4 prix Nobel directement liés : 1972, 1973, 1987, 2003 (+ 1913)



Câbles d'alimentation des expériences du CERN :
en haut, les câbles du LEP ;
en bas, les câbles du LHC, supraconducteurs

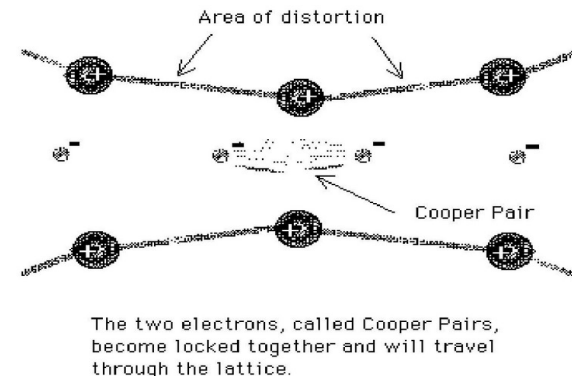
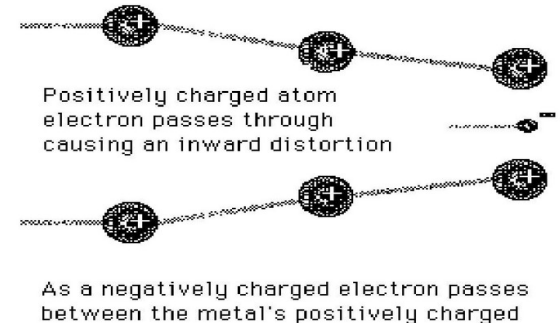
La température critique

- BCS (dark green circle)
- Heavy fermion-based (light green star)
- Cuprate (blue diamond)
- Buckminsterfullerene-based (purple inverted triangle)
- Carbon-allotrope (red triangle)
- Iron-pnictogen-based (orange square)
- Strontium ruthenate (grey pentagon)
- Nickel-based (pink six-point star)



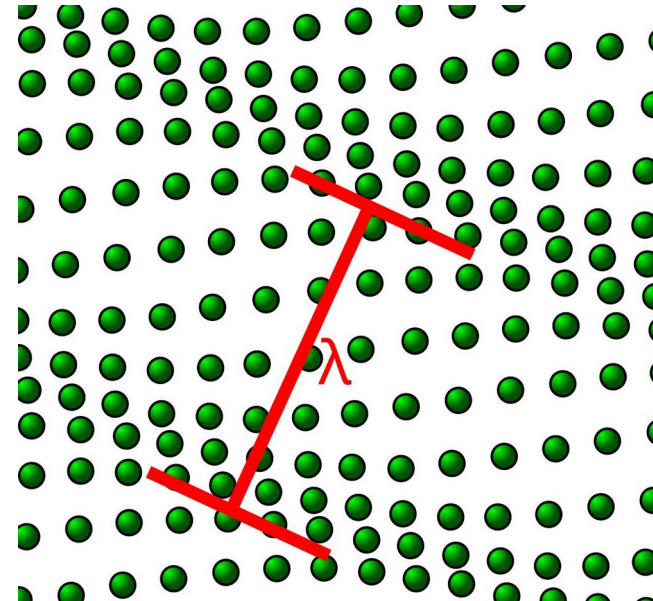
Éléments théoriques (1)

- **Théorie BCS** 1957 (Bardeen, Cooper, Schrieffer) → PNP 1972
 - Bardeen PNP 1956 (semi-conducteurs) !
- Découverte en 1911 → ~ 50 ans d'attente !
- Lorsqu'un électron (-) passe dans un réseau métallique d'ions (+), il **attire ces ions** qui vibrent et, en raison de leur grande masse, **mettent du temps à retrouver leur position d'équilibre**
- Il y a donc un **excès de charges + sur le trajet de l'électron**, qui va attirer un 2^{ème} électron (de spin opposé) → à basse température, **force attractive entre les 2 électrons** (malgré la **force répulsive de Coulomb**)
- Les électrons se regroupent en « **paires de Cooper** » (configuration plus favorable en termes d'énergie)

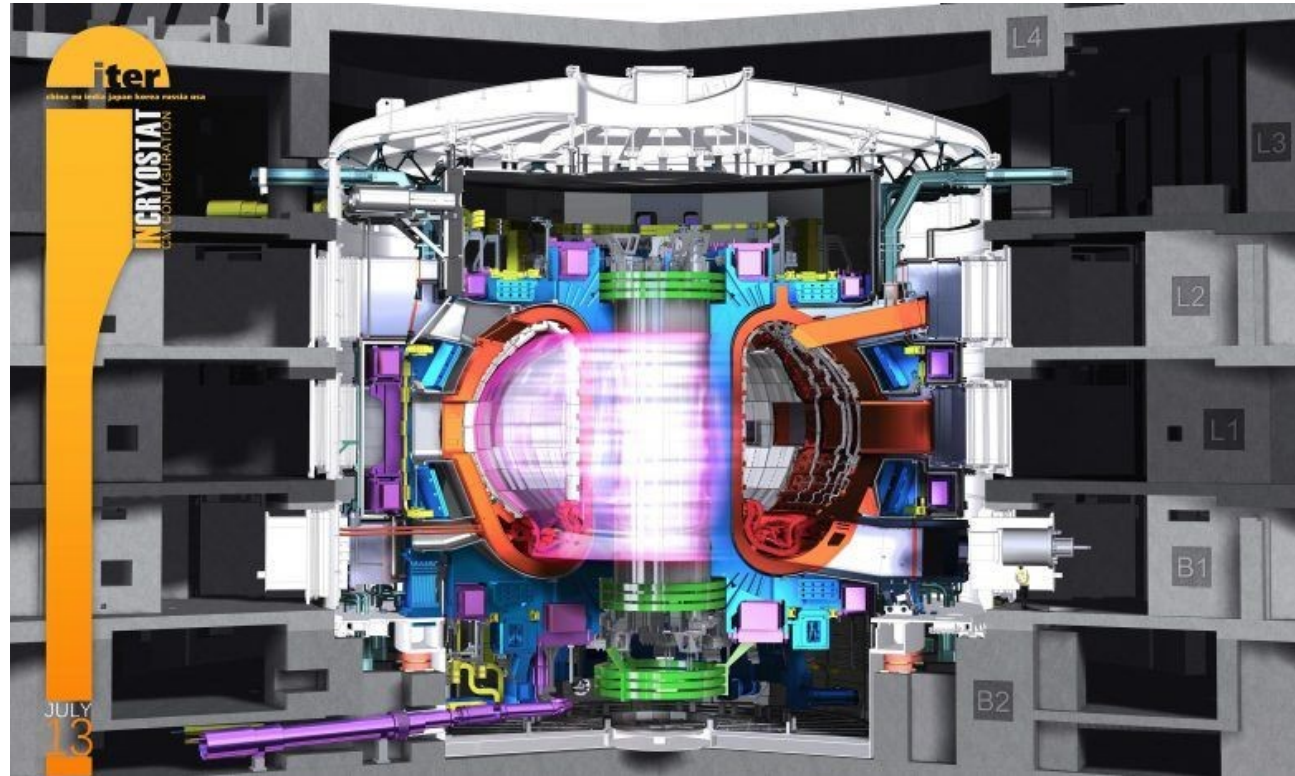


Éléments théoriques (2)

- Les électrons se regroupent en « **paires de Cooper** » : **2 fermions** → **1 boson**
- Ces paires adoptent un **comportement collectif** (« **condensat** »).
Conséquence : séparer **une** paire d'électrons demande **autant d'énergie** que séparer **toutes** les paires
- → les vibrations du réseau n'affectent plus les paires d'électrons **dans leur ensemble**, ni donc individuellement
- → les électrons se déplacent **collectivement sans résistance**
- On peut décrire cette interaction comme un échange de « **phonons** » (= **quasi-particules** décrivant l'excitation quantique des **vibrations du réseau cristallin** dans un solide)



Le magnétisme

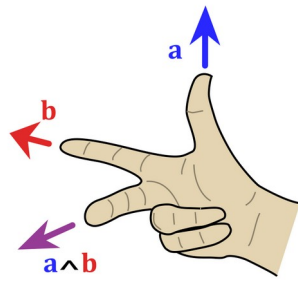
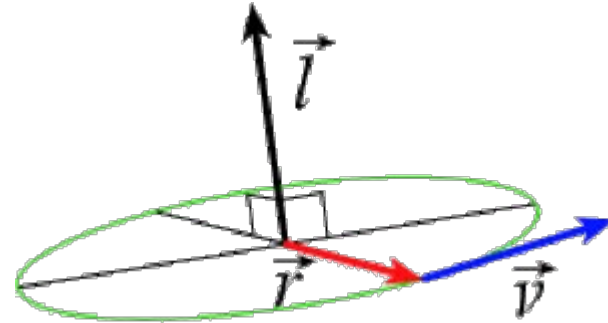


Le moment cinétique

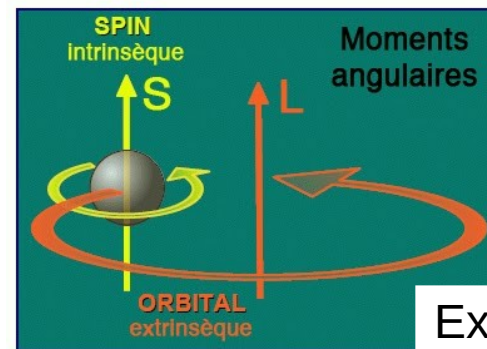
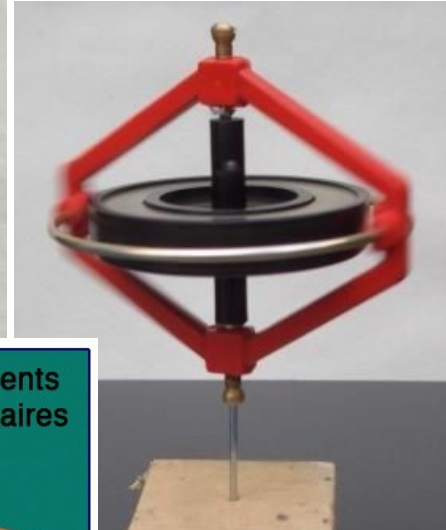
- Moment cinétique (« angulaire ») **extrinsèque** :

$$\vec{L} = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{p} = \vec{r} \wedge m \vec{v}$$

- Moment angulaire **intrinsèque** dû à la **rotation de l'objet sur lui-même**
- **Théorème** : quantité conservée pour un système isolé → gyroscope, patinage artistique

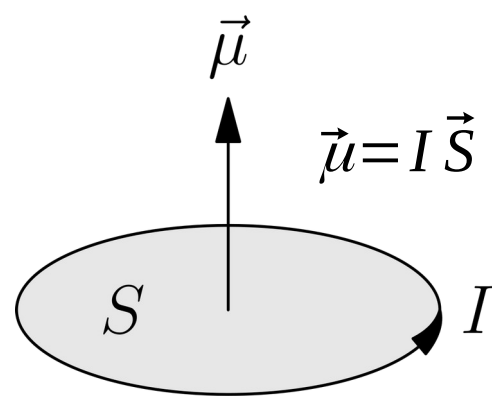


En mécanique classique



Le moment magnétique

- Grandeur **vectorielle** caractérisant l'**intensité d'une source magnétique**, notée M ou μ (boucle de **courant électrique** = **déplacement d'une particule chargée** ou **objet aimanté**)
- Manifestation : tendance à s'aligner avec le champ magnétique (ex : aiguille d'une boussole)
- Tout système possédant un moment magnétique produit un champ magnétique
- Le **moment magnétique** orbital μ_L d'une particule de charge q et de masse m est lié au **moment cinétique** orbital L :
 - Il s'agit ici du moment cinétique orbital « **extrinsèque** », dû au **mouvement** de la particule chargée
- En 1922, les physiciens Stern et Gerlach ont mis en évidence l'existence d'un moment magnétique « **intrinsèque** », dit de « **spin** » :
un électron est ~ un petit aimant



$$\vec{\mu}_L = \frac{q}{2m} \vec{L}$$

Le magnétisme

- **Aimantation** d'un matériau = somme des **moments magnétiques** divisée par le volume

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i$$

- **Champ magnétique** :

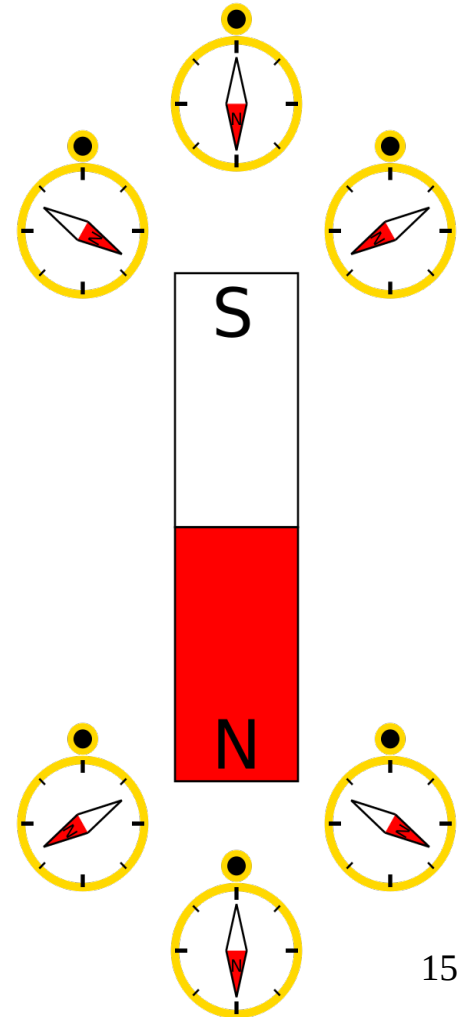
- B : champ total à l'intérieur du matériau
- H : excitation magnétique (champ mag. extérieur)
- M : aimantation = **réaction du matériau** à H
- **B est la grandeur apparaissant dans les équations de Maxwell**

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

- **Susceptibilité magnétique** (χ) : capacité d'un matériau à s'aimanter quand il est soumis à une **excitation magnétique H**

- = 0 : vide
- $\sim -10^{-5/6}$: **diamagnétisme**
- $10^{-5} - 10^{-3}$: **paramagnétisme**
- $> 10^4$: **ferromagnétisme** (ex : aimants)

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



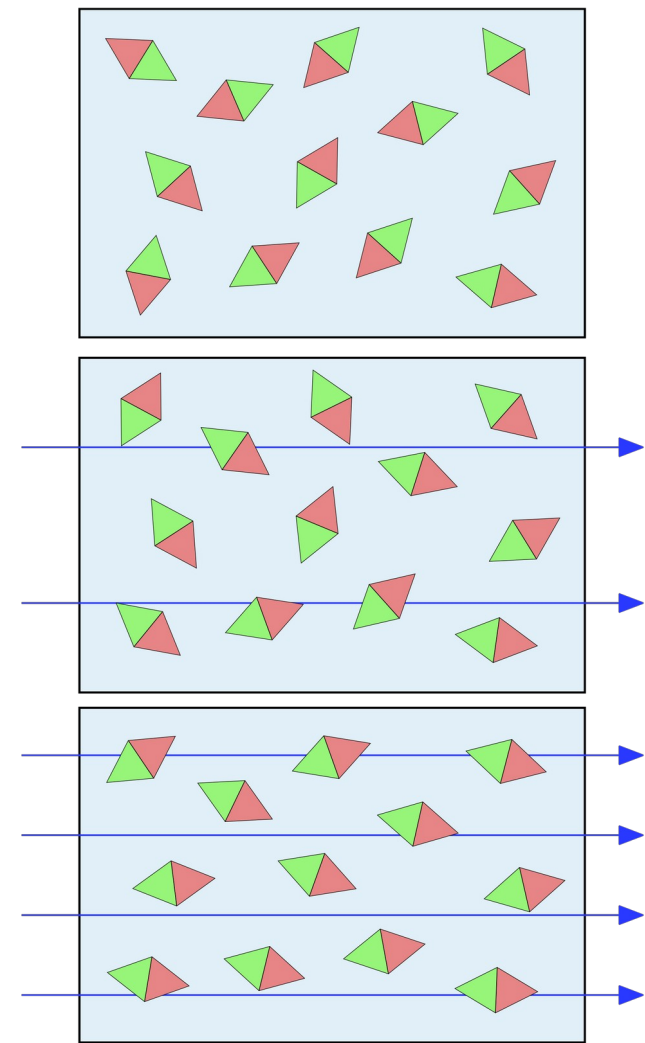
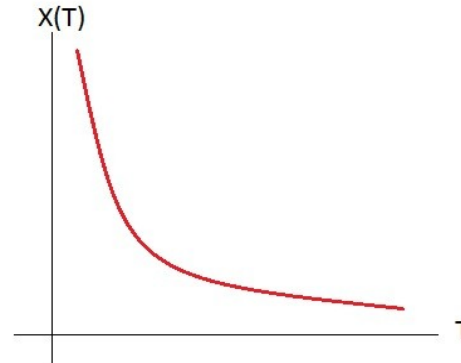
Le diamagnétisme

- Préfixe « dia » = « à travers » : dialogue, diachronie, ...
- Tous les matériaux **sont diamagnétiques**
 - Mais diamagnétisme parfois **masqué** par d'autres formes de magnétisme
- Apparition d'un **faible champ magnétique opposé au champ magnétique extérieur** : $\chi \sim -10^{-5/6}$
- **L'eau est diamagnétique**
 - Naturellement non magnétique
 - → repoussée par un aimant, ce qui permet de faire léviter des animaux (et, théoriquement, des humains) dans un champ magnétique fort : 10-20 T
 - (rappel : champ mag. terrestre $\sim 50 \mu\text{T}$)
 - prix Ig Nobel (« recherches qui font d'abord rire ... puis réfléchir) en 2000 à A. Geim, qui aura plus tard le PNP pour la découverte du graphène en 2010



Paramagnétisme

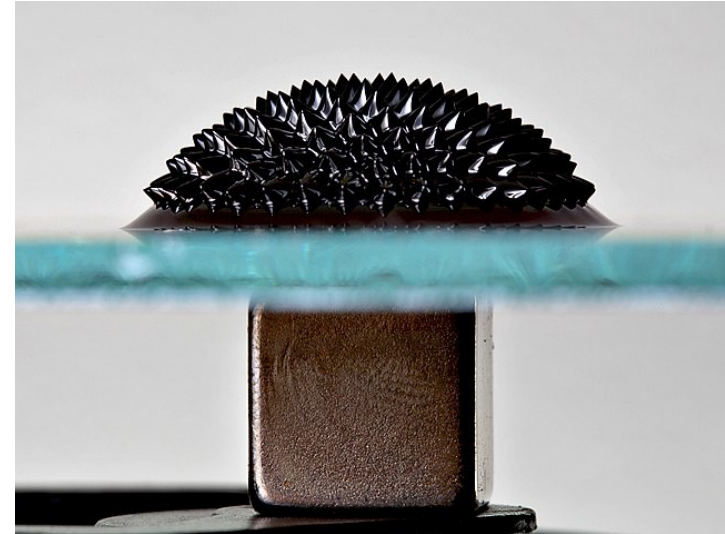
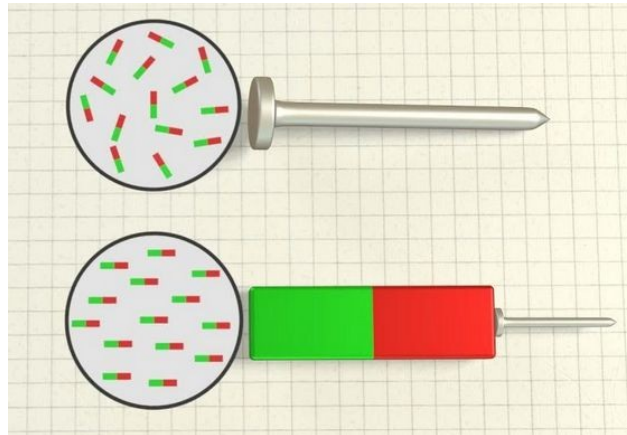
- Matériaux **naturellement non magnétiques** : les spins sont désordonnés et oscillent de manière aléatoire
- qui acquièrent une aimantation **dans le sens du champ magnétique extérieur**
 $\chi \sim 10^{-3/5}$
- Compétition avec l'agitation thermique qui désaligne les moments magnétiques
→ loi de Curie



Champ : nul, faible, fort ¹⁷

Ferromagnétisme

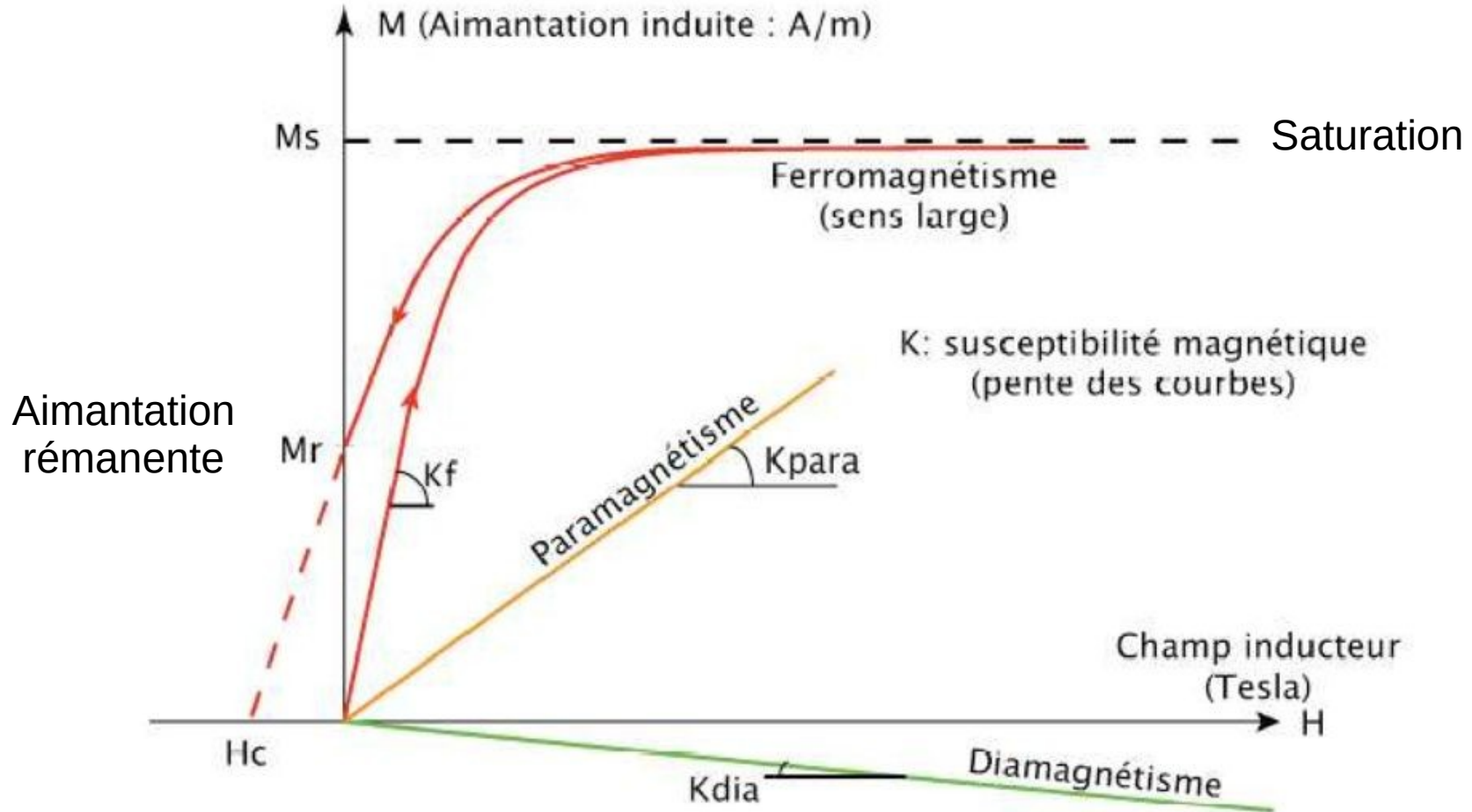
- **Ferromagnétisme** = mécanisme par lequel un matériau est
 - **Attiré par** un aimant
 - **Lui-même** un aimant
- Les spins interagissent fortement et **s'alignent avec l'excitation magnétique**
- = capacité à s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique extérieur et à éventuellement **rester aimanté** quand le champ disparaît
 - **aimants permanents**



Ferrofluide = suspension colloïdale (taille entre 1 nm et 1 μm) de nanoparticules ferromagnétiques.

Ici : sur une plaque en verre au-dessus d'un aimant

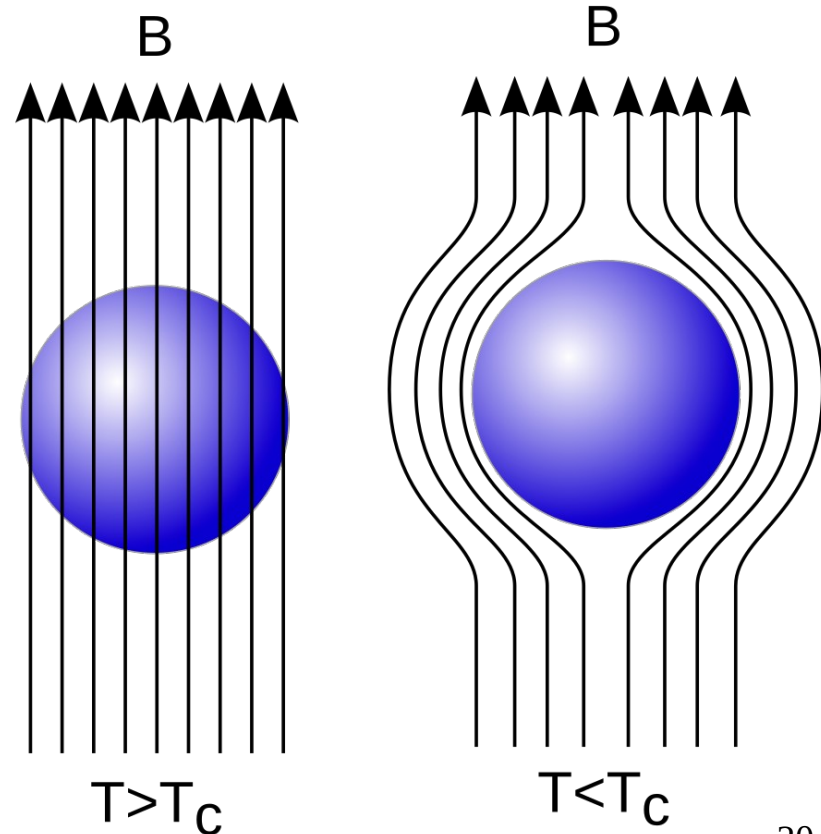
Résumé



L'effet Meißner(-Ochsenfeld) (1933)

- Deuxième phénomène associé à la supraconductivité
 - = **expulsion totale du champ magnétique**
 - = **diamagnétisme parfait** : $\chi = -1$
- Des **courants électriques** apparaissant à la surface du supraconducteur et génèrent un champ magnétique qui s'oppose exactement à l'excitation magnétique extérieure :

$B=0$ à l'intérieur



La lévitation (quantique)

- Lorsque l'on place un aimant au-dessus d'un supraconducteur, le SC réagit en produisant un champ opposé à celui de l'aimant
→ l'aimant lévite
- Marche aussi à l'envers : **suspension**
- Il existe une force de stabilisation qui fait que l'objet garde la même position (mémoire)

Pour plus de détails (et une démo !) :
[youtube.com/watch?v=6kg2yV_3B1Q](https://www.youtube.com/watch?v=6kg2yV_3B1Q)

