

Cours No 8

Propriétés Electriques, Magnétiques et

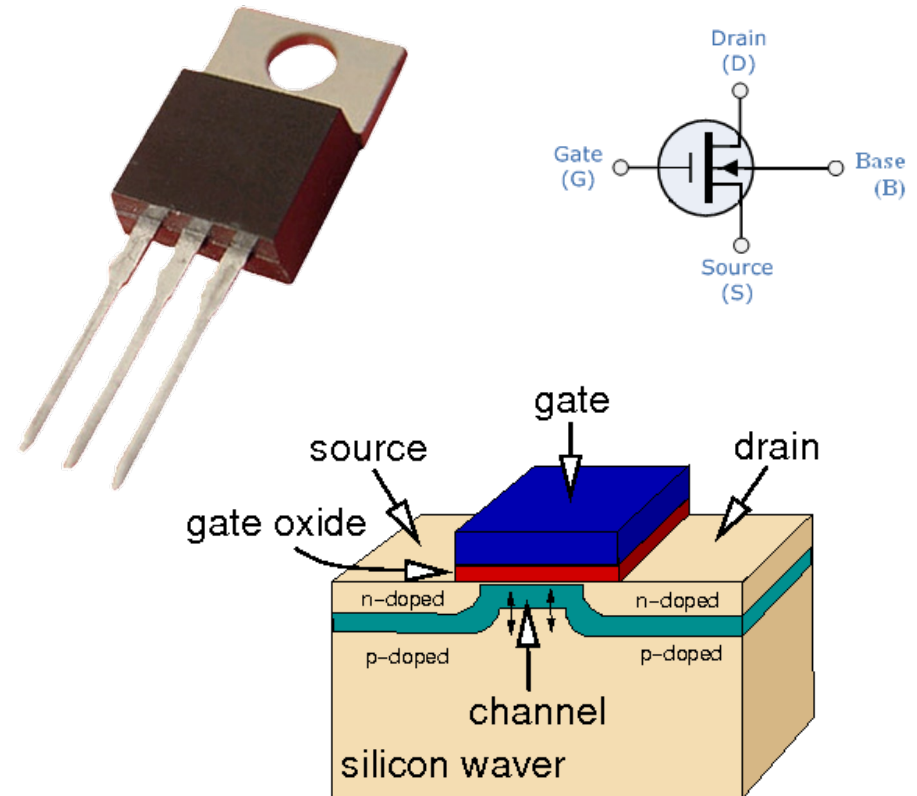
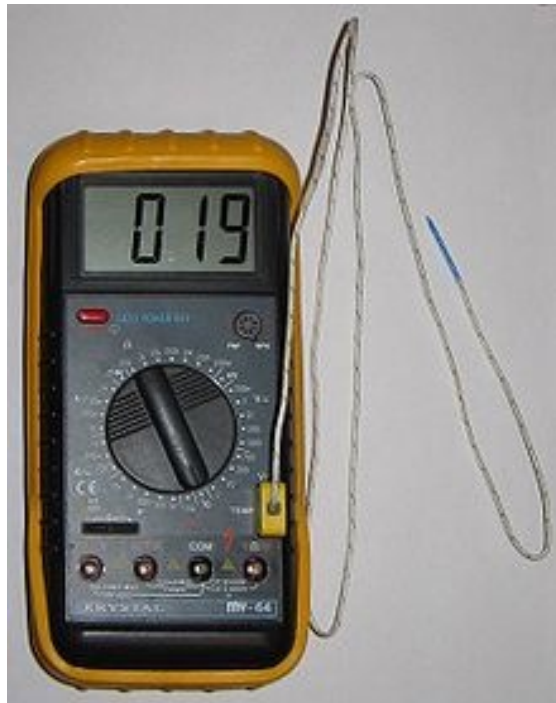
Optiques

Francesco Stellacci

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Introduction

De plus en plus de matériaux sont utilisés pour leurs **propriétés fonctionnelles**, notamment électriques, tout en devant posséder certaines caractéristiques mécaniques.



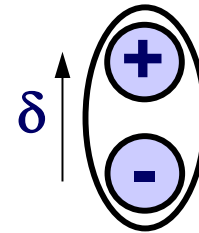
Metal-Oxide Field-Effect Transistor (MOSFET)

Charges et dipôles

Avant d'aborder les **propriétés fonctionnelles** des matériaux, il convient de donner quelques définitions:



Charge
 $\pm q$ [As]



Dipôle électrique
 $\mathbf{p} = q\delta$ (vecteur)
[As m]

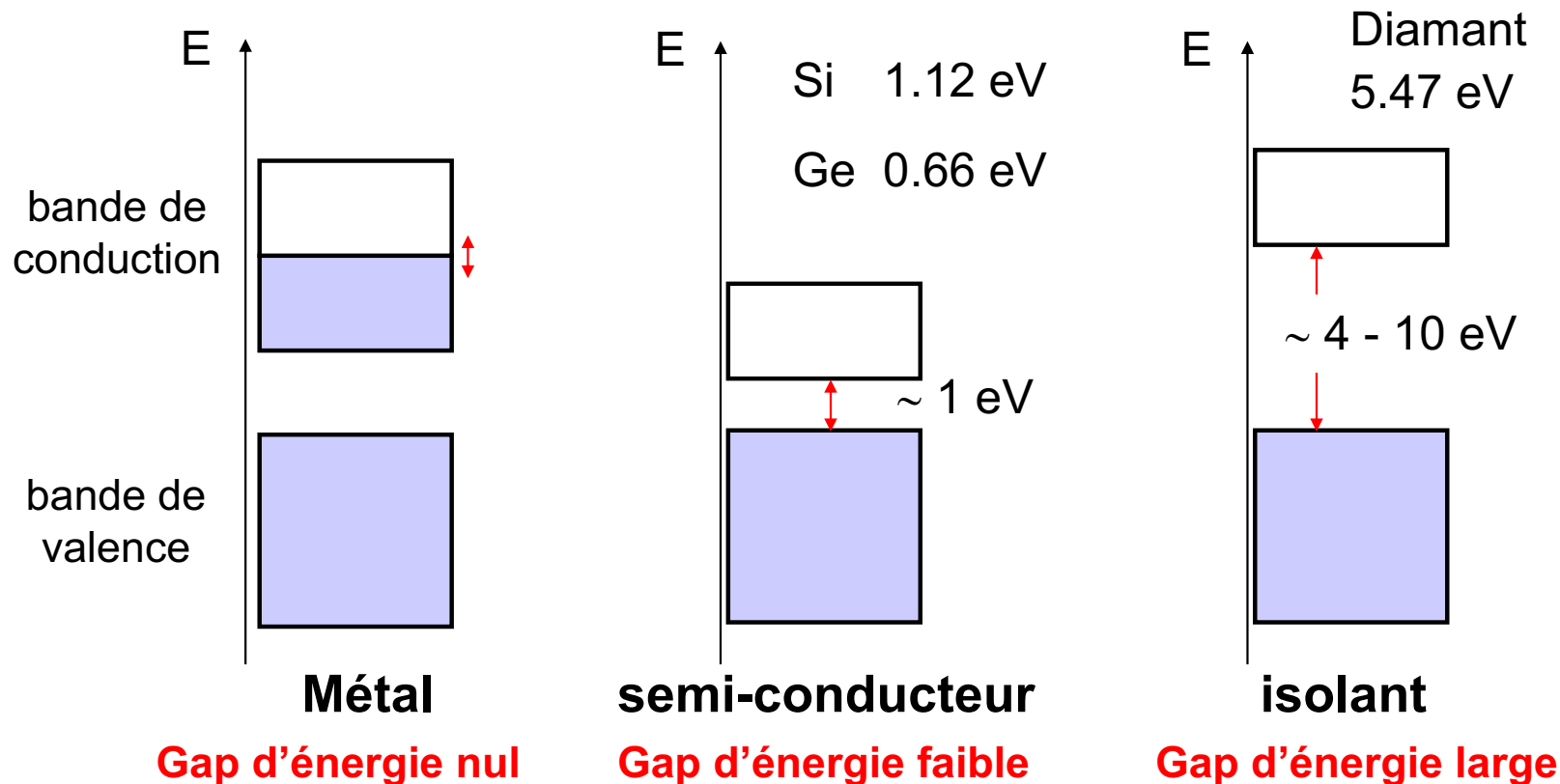
La matière peut être chargée ($\sum q_i \neq 0$), mais à l'état non-chargée elle peut contenir un ensemble de dipôles électriques et/ou magnétiques. On définit alors les vecteurs **Polarisation \mathbf{P}** :

$$\mathbf{P} = \frac{1}{V} \sum_i \mathbf{p}_i \text{ [Asm}^{-2}\text{]}$$

Electrons dans les solides

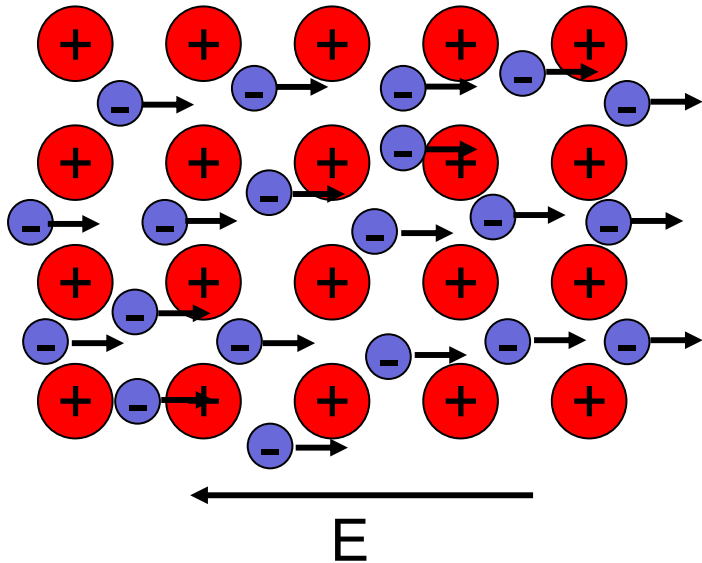
Dans un solide, l'ensemble des orbitales des e^- se combinent pour donner des **niveaux d'énergie quasi-continus**, formant des **bandes d'énergie**. Selon comment les bandes d'énergie sont occupées, le matériaux aura des propriétés fonctionnelles différentes.

Le **gap d'énergie** entre les états occupés et les états libres notamment détermine la nature des propriétés électriques d'un matériau:



Conductivité électrique des métaux

Les **métaux conduisent l'électricité**, i.e., il y a déplacement des électrons sous l'action d'un champ électrique.



Le modèle de Drude consiste à écrire que le mouvement des e^- résulte de la force électrique et d'une force de "frottement" ou de friction exercée par les ions $+$.

$$m_e \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E} - \frac{m_e}{\tau} \mathbf{v}$$

En régime stationnaire: $\mathbf{v} = \frac{-e\tau}{m_e} \mathbf{E}$

C'est une vitesse moyenne. On définit alors la mobilité des électrons par:

$$\mathbf{v}_e = -\mu_e \mathbf{E} \qquad \mu_e = \frac{e\tau}{m_e} \quad [\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$$

τ est le temps moyen entre deux « collisions » subies par un électron

Conductivité électrique des métaux

A cette vitesse des charges est associé un courant. En normalisant par rapport aux dimensions du matériau, on raisonne plutôt en terme de **densité de courant \mathbf{j}_e** .

$$\mathbf{j}_e = -n_e e \mathbf{v} = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e} \mathbf{E} = \sigma_e \mathbf{E} = \rho_e^{-1} \mathbf{E} \qquad \frac{1}{\rho_e} = \sigma_e = \frac{e^2 n_e \tau}{m_e}$$

où σ_e est la **conductivité électrique** et ρ_e la **résistivité électrique** [$\Omega \cdot m$].

e est la charge (C), n_e est la densité d'électrons libres en m^{-3} , τ est le temps moyen entre deux « collisions », et m_e la masse de l'électron.

On peut écrire cette relation aussi comme un flux de charges résultant d'un gradient !

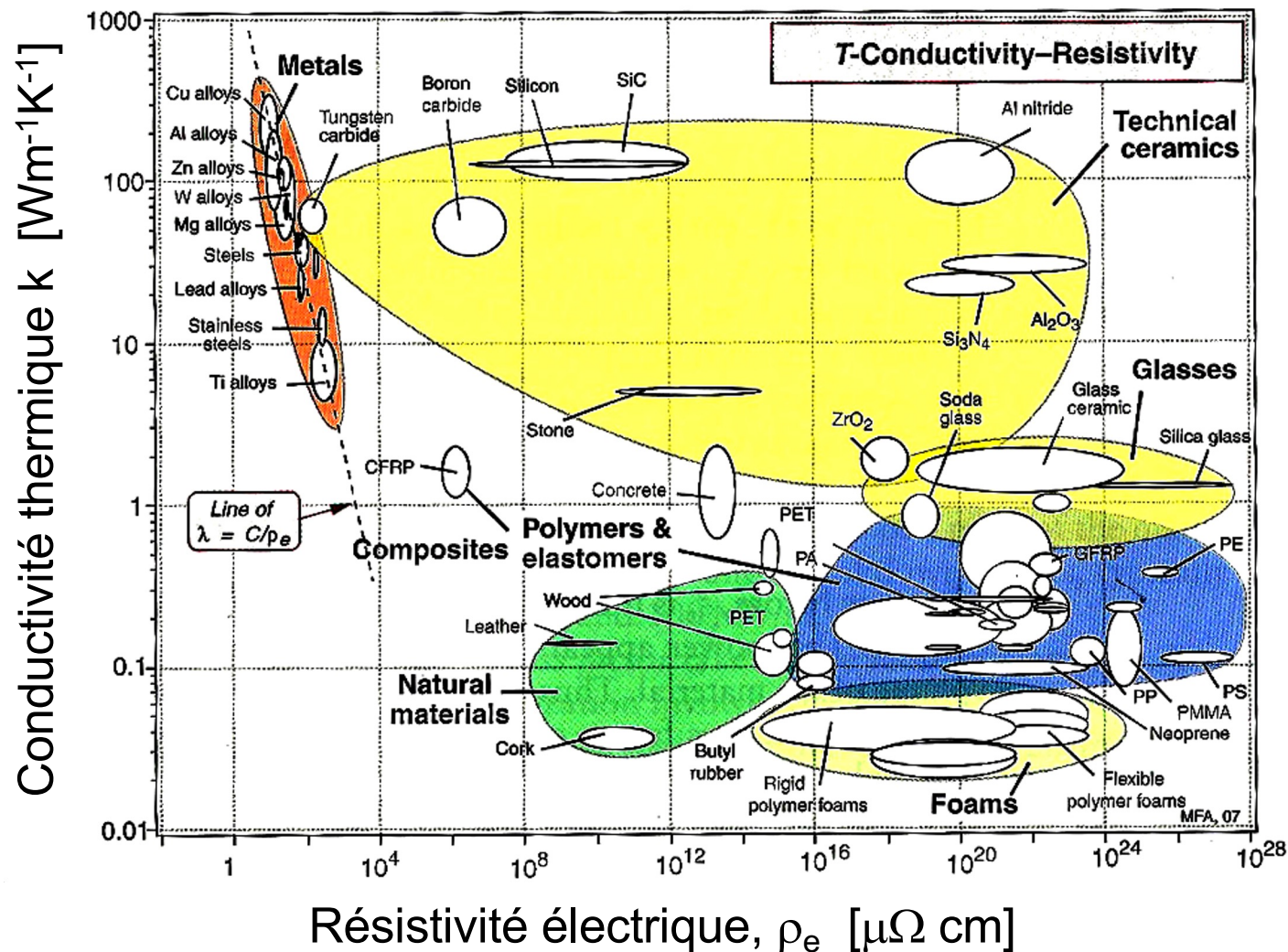
$$\mathbf{J}_e = -\sigma_e \nabla V$$

\mathbf{j}_e est aussi appelé la densité de courant, le courant étant donné par: $I = \mathbf{j}_e \cdot \mathbf{S}$

Comme $E = \frac{V}{d}$ et $V = RI$ on a: $R = \rho_e \frac{d}{S} \quad [\Omega]$

Conductivité électrique des métaux

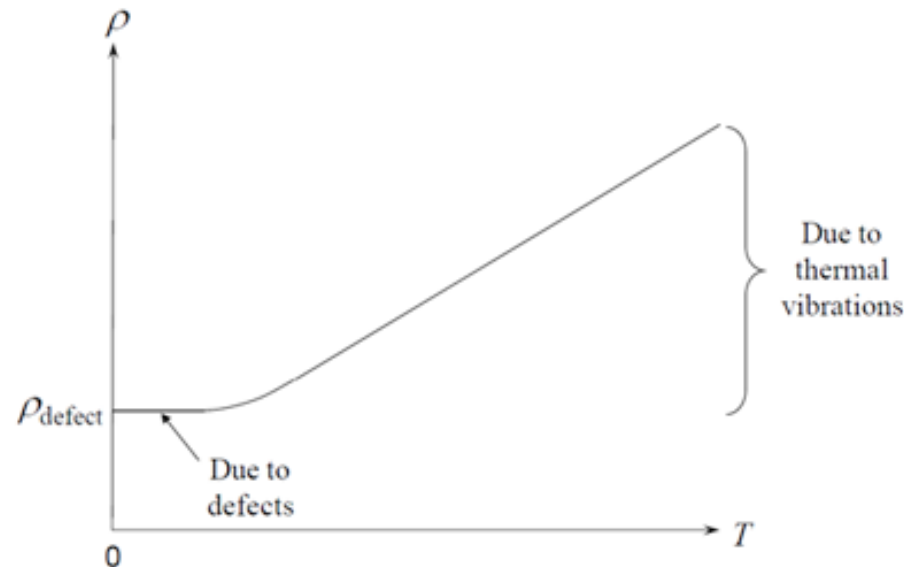
Le modèle de Drude donne le bon ordre de grandeur pour la résistivité électrique des métaux. Remarquez l'échelle de ρ_e !



Conductivité électrique des métaux

Etrangement, la **résistivité électrique des métaux augmente avec la température !**

$$\frac{1}{\rho_e} = \sigma_e = \frac{e^2 n_e \tau}{m_e}$$

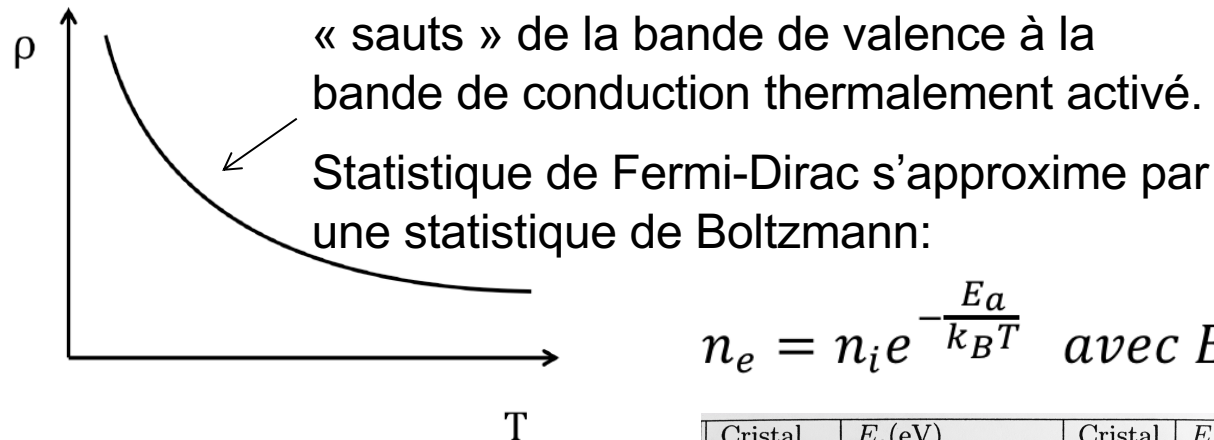


- La température fait vibrer le crystal, ce qui augmente les « collisions » entre les électrons et le crystal (ou les « phonons »).
- τ alors diminue, ce qui a pour effet de diminuer la vitesse moyenne, et donc la conductivité électrique.
- Les impuretés peuvent ralentir les électrons et donc diminuer aussi la conductivité.
- La masse m_e est en fait une « masse effective » dû au potentiel périodique

Semi-conducteurs

A l'inverse des métaux, les semi-conducteurs ont une résistivité qui diminue quand leur température augmente !

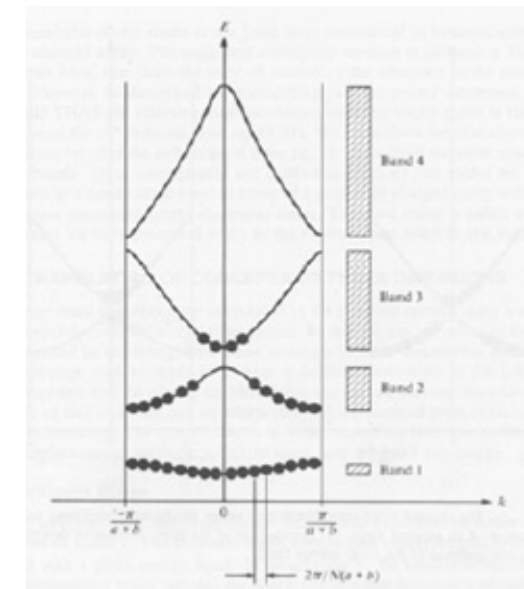
Le modèle de Drude s'applique aussi pour les électrons de la bande de conduction.



$$n_e = n_i e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \text{ avec } E_a \approx \frac{E_g}{2}$$

$$\frac{1}{\rho_e} = \sigma_e = \frac{e^2 n_e \tau}{m_e}$$

Cristal	E_g (eV)	Cristal	E_g (eV)
Diamant	5.33	PbS	0.34
Si	1.12 (1.17, 4 K)	PbSe	0.27
Ge	0.67	PbTe	0.30
InSb	0.23	CdS	2.42
InAs	0.33	CdSe	1.74
InP	1.25	CdTe	1.8
GaAs	1.43 (1.52, 4 K)	ZnO	3.2
AlSb	1.6	ZnS	3.6
GaP	2.25	ZnSe	2.60
SiC	3	AgCl	3.2
Te	0.33	AgI	2.8
ZnSb	0.56	Cu ₂ O	2.1
GaSb	0.78	TiO ₂	3

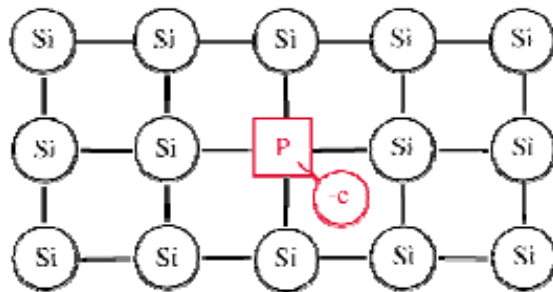


Gap d'énergie à 300 K de plusieurs matériaux:

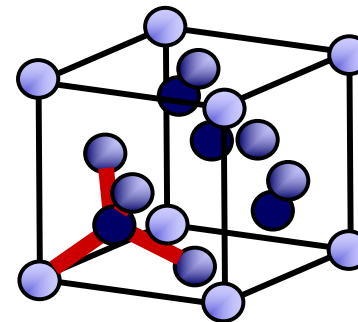
Semi-conducteurs: dopage

Le dopage des semiconducteurs permet de moduler leur propriétés électriques et notamment de changer leur conductivité électrique, mais pas leur gap d'énergie.

taux de dopage typique: $10^{17} - 10^{19}$ atomes.cm⁻³



Si dopé au Phosphore



Si

L'électron supplémentaire du P est peu lié : l'énergie d'activation E_a est faible ($E_a \ll E_g / 2$) et à T ambiante, presque un électron par P se trouve dans la bande de conduction, ou libre.

- $n_e(\text{Si}) \approx 10^{10} - 10^{11}$ atomes.cm⁻³ intrinsèque, c.à.d. sans Phosphore ajouté.
- $n_e(\text{Si}) \approx 10^{17} - 10^{19}$ atomes.cm⁻³ dopé au Phosphore.

Potentiel disruptif des isolants

Les matériaux non-conducteurs (la plupart des céramiques et des polymères) ont une très grande résistivité électrique. Mais au-delà d'un champ électrique, appelé **champ disruptif** ou **rigidité diélectrique**, ils peuvent se ioniser et conduire l'électricité (**claquage**).



Air sec: 36'000 V/cm

12 Air humide: 10'000 V/cm

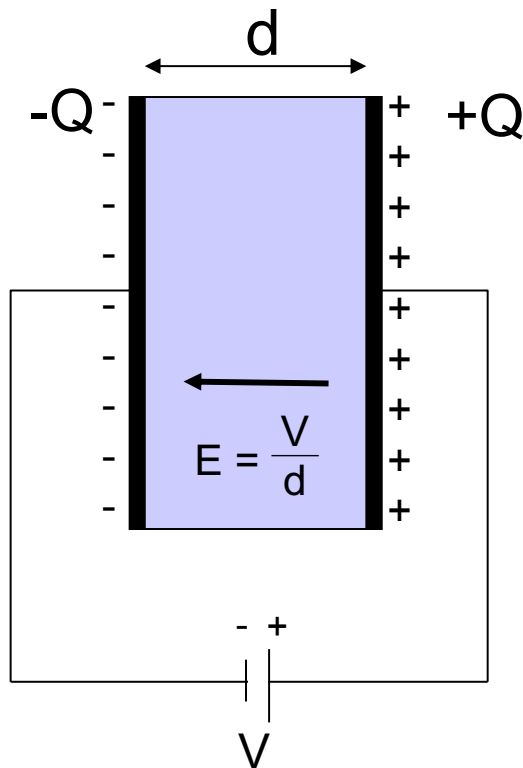


Isolateur

Matériau	E_{disr} [MV/m]
Quartz	8
SrTiO_3	8
Néoprène	12
Nylon	14
Pyrex	14
Huile silic.	15
Papier	16
Polystyrène	24
Téflon	60

Propriétés diélectriques

Au-delà de leur grande résistance électrique, un isolant électrique se caractérise par sa **constante diélectrique** ϵ_r . Mis entre deux plaques de métal, les isolants vont former un autre type de composant électrique: **le condensateur**.



Ce condensateur plan de surface S , soumis à une différence de potentiel V , accumule dans le temps une charge Q sur ses plaques donnée par:

$$Q = CV \text{ avec } C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

Capacité

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ As (Vm)}^{-1}$$

Permittivité
diélectrique du vide

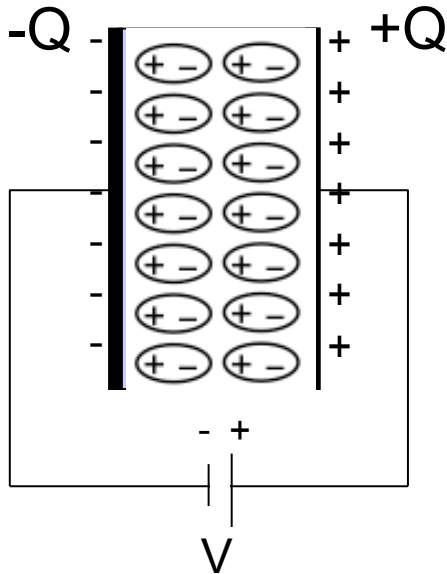
$$\epsilon_r \geq 1$$

Constante diélectrique

Ces charges viennent des électrons libres des plaques du métal qui s'accumulent sur une plaque, et sont « expulsées » de l'autre.

Propriétés diélectriques

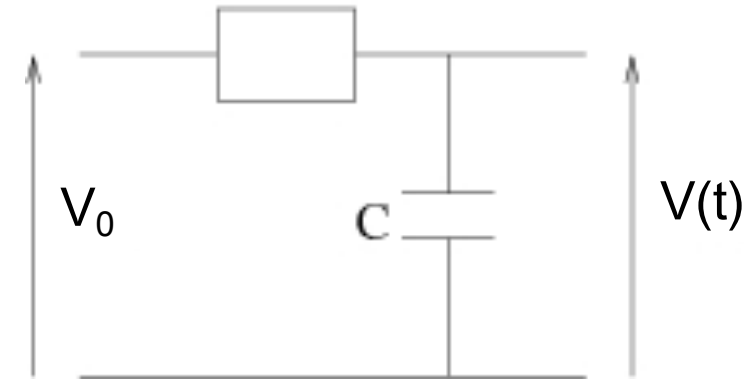
Malgré une densité de charges libres nulle dans l'isolant, un courant passe !!



$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

$$I(t) = \frac{V_0 - V(t)}{R}$$

$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-t/RC}$$



Energie emmagasinée (ou fournie)
pendant dt: $\delta W = I(t) \times V(t) \times dt$

Dans les diélectriques, plus la constante diélectrique est grande, plus la polarisation est importante. Ces dipôles créent un champ électrique moyen qui s'oppose au champ imposé par les plaques chargées. Pour maintenir un champ stationnaire $E = V/d$, il faut donc imposer une charge plus grande aux plaques du condensateur, d'où une plus grande capacité proportionnelle à ϵ_r .

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_E \mathbf{E}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$$

$$\epsilon_r = (1 + \chi_E)$$

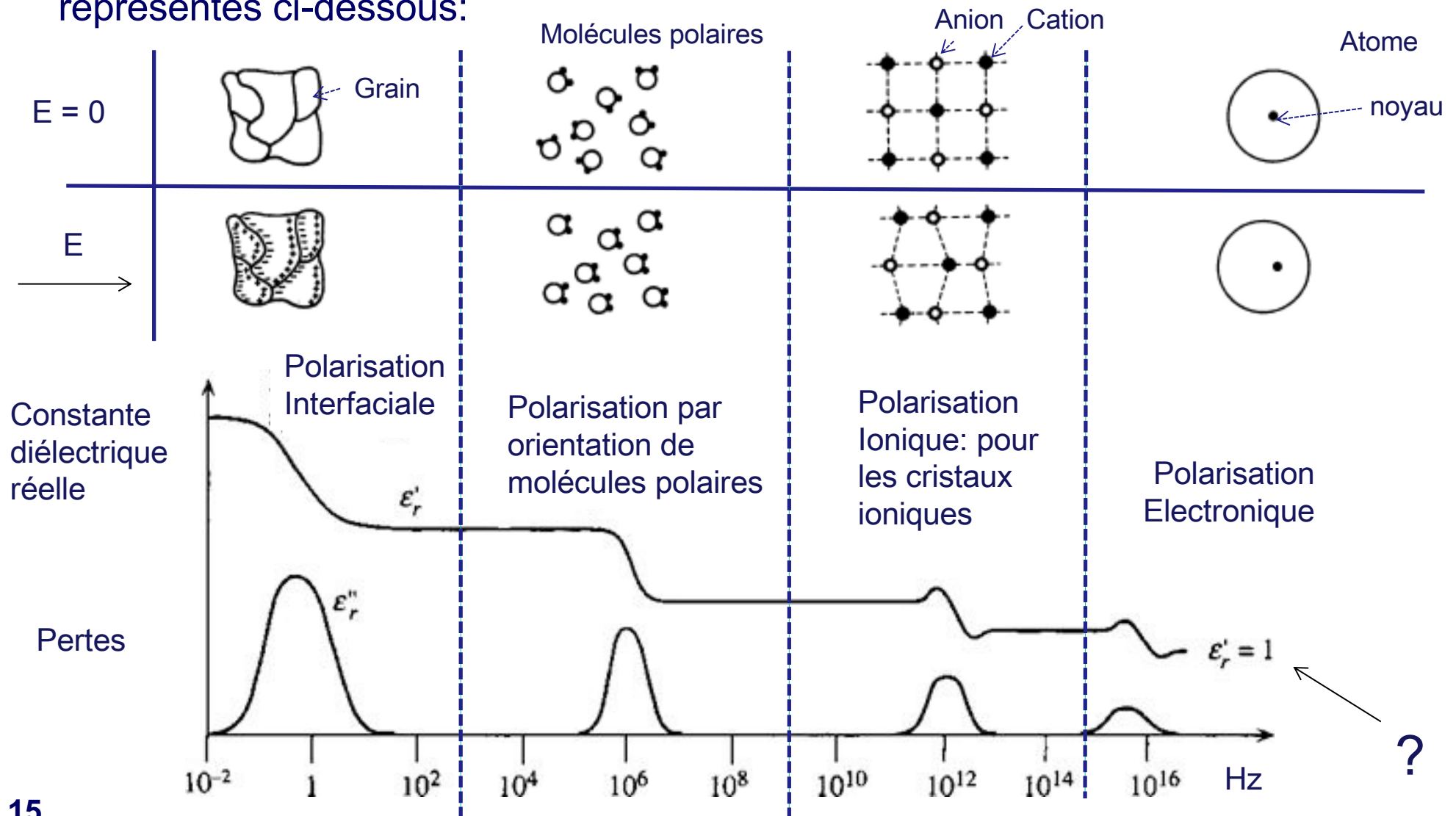
χ_E est la Susceptibilité électrique

\mathbf{D} est le champ de déplacement

ϵ_r dépend donc directement de la densité de dipôles électriques

Propriétés diélectriques

Les différents mécanismes de polarisation et leur fréquence caractéristique sont représentés ci-dessous:



Propriétés diélectriques

- La constante diélectrique dépend de la fréquence du champ E appliqué
- Les liquides et les solides peuvent avoir des constantes diélectriques très différentes selon la nature des liaisons et des structures.

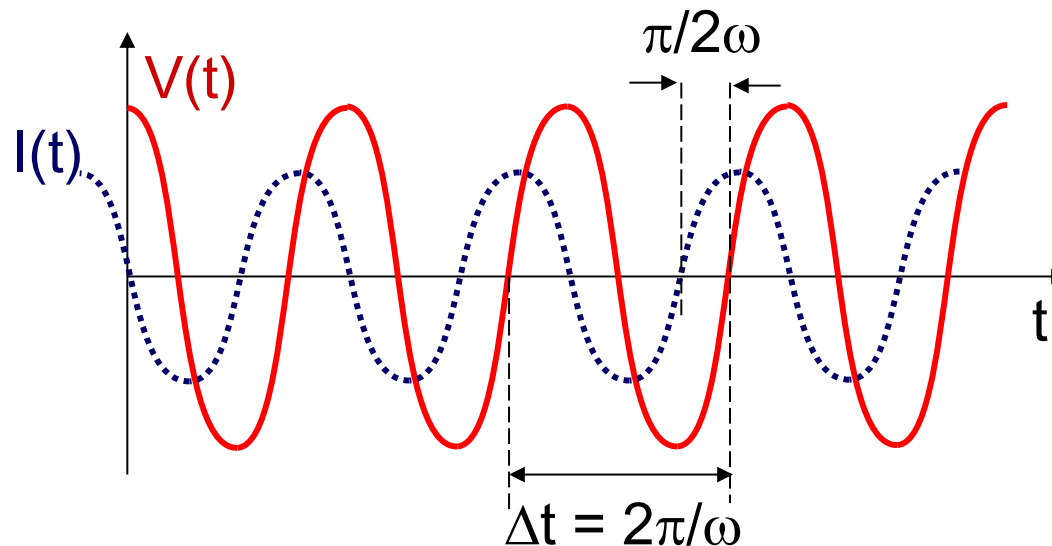
Matériaux	ϵ_r à 1kHz
Vide	1
Eau	30-88 (selon T)
Verres	3.5-10
PTFE (Teflon)	2.1
Polystyrene	2.4 – 2.7
Sel (NaCl)	6.1
TiO ₂	90
Strontium titanate	300
Barium strontium titanate	510

Propriétés diélectriques

Les matériaux isolants sont pour la plupart **diélectriques**, avec $1 < \epsilon_r < 20$. Les atomes n'ont pas de dipôle électrique sans champ, mais l'application d'un champ rend la répartition des charges asymétrique et induit un dipôle.

Pour une capacité idéale, on a:
$$Q(t) = \int_0^t I(t') dt' = CV(t) \quad \text{ou} \quad I = C \frac{dV}{dt}$$

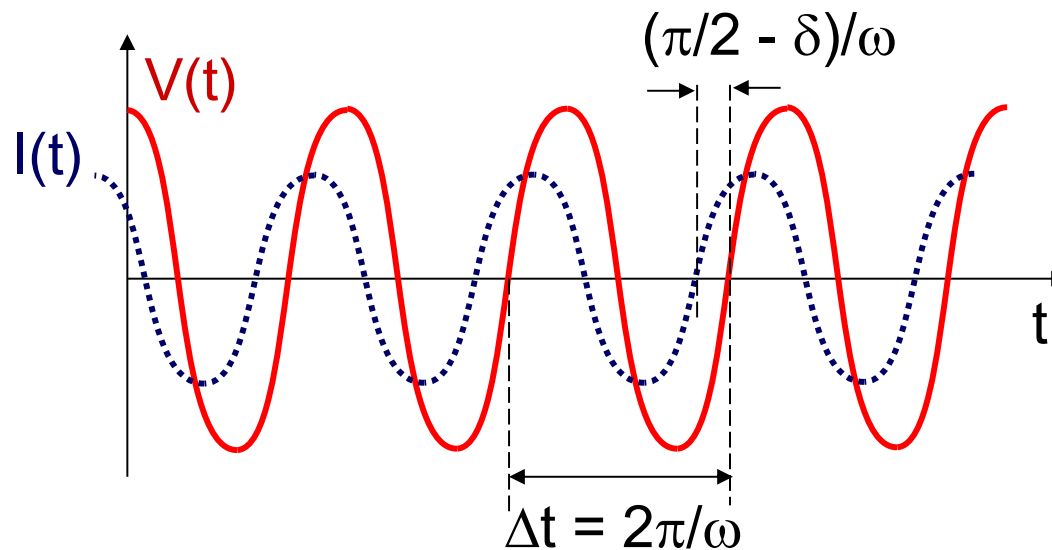
Dans le cas d'une différence de potentiel alternative $V_0 \cos(\omega t)$, le courant est précisément déphasé de $\pi/2$ par rapport à la tension:



Propriétés diélectriques

Un diélectrique placé dans le condensateur avec un potentiel alternatif verra un courant pas exactement déphasé de $\pi/2$, ce qui engendre des pertes d'énergie proportionnelles au **coefficient de perte diélectrique L_e** :

$$L_e = \varepsilon_r \tan \delta$$

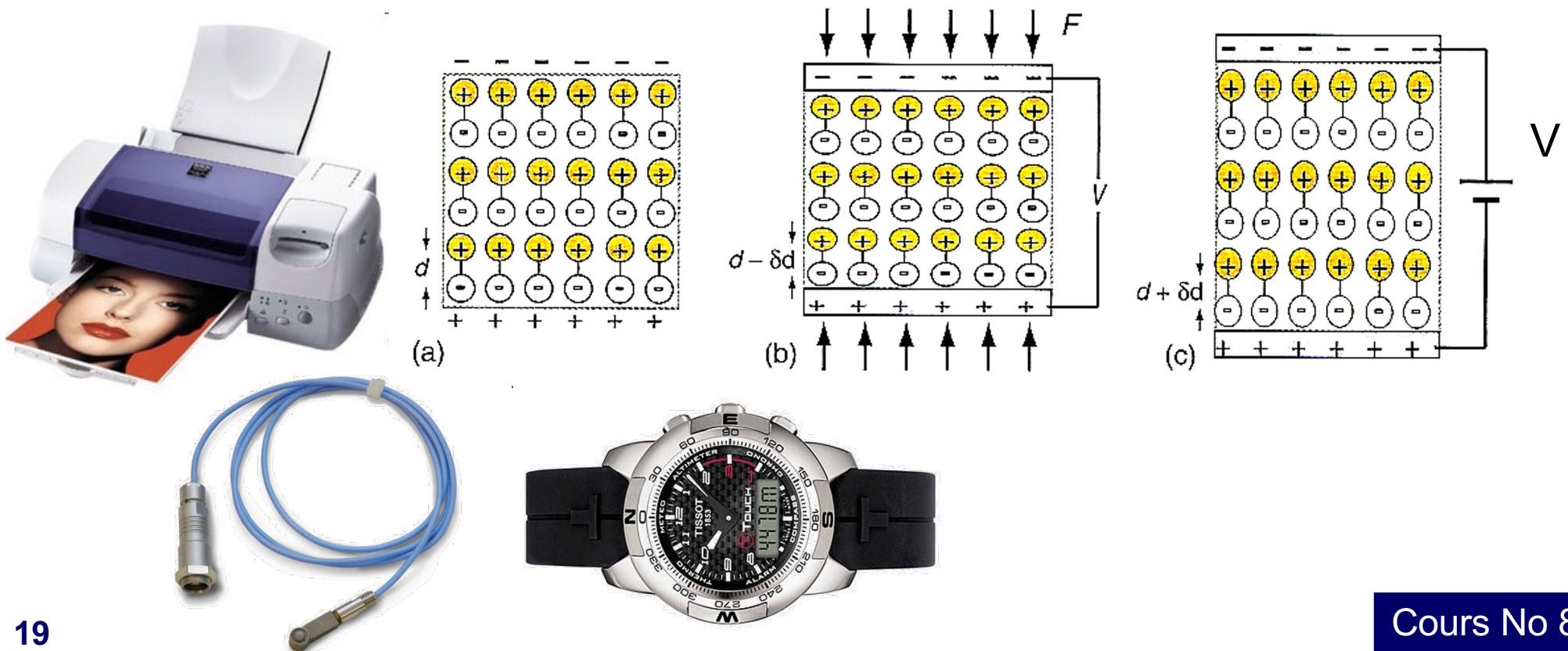


Ces pertes sont dues à des résonnances dans le matériau, et se traitent mathématiquement comme si la constante diélectrique était un nombre complexe:

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r + i\varepsilon''_r = |\varepsilon_r|e^{i\delta}$$

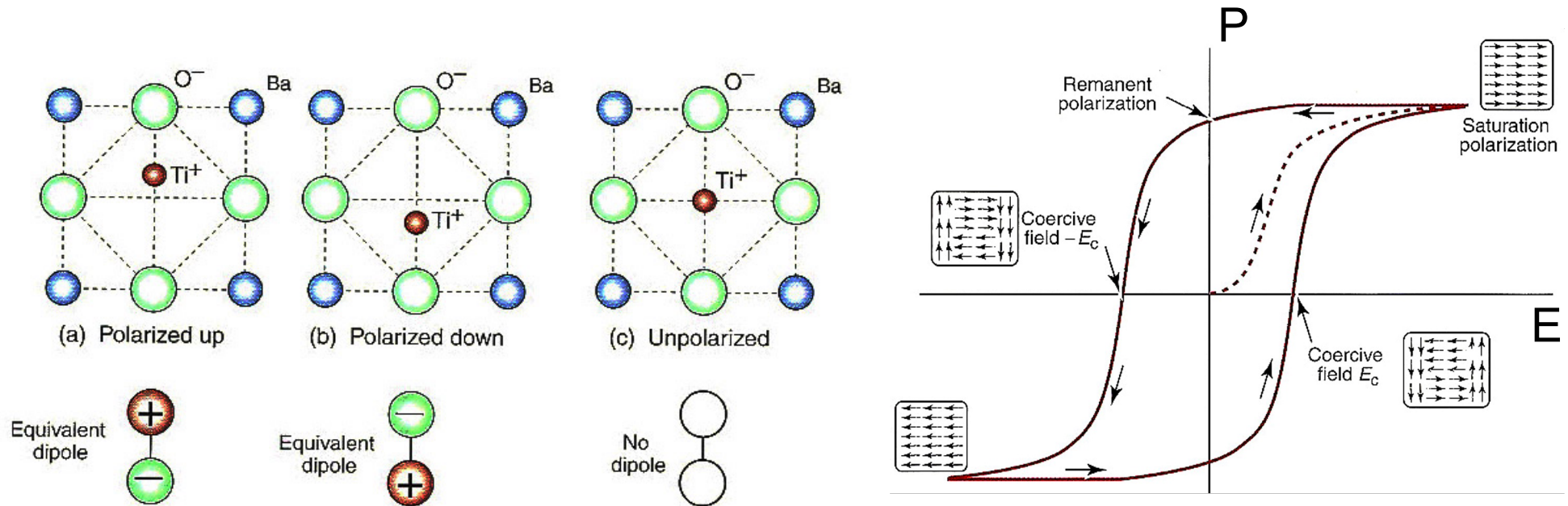
Propriétés diélectriques

Certains matériaux isolants ont des propriétés électriques plus complexes. Les **Piezo-électriques** (e.g., quartz) sont des cristaux non *centro-symétriques*: En appliquant une contrainte (déformation), on fait apparaître des dipôles et donc une polarisation/champ électrique. Réciproquement, en appliquant une différence de potentiel, on change le paramètre de maille (déformation).



Propriétés diélectriques

Les **ferroélectriques** tels que BaTiO_3 , ont un dipôle réversible que l'on peut orienter dans un champ E : en dessous d'une température de Curie, ils peuvent garder leur polarisation. Ils doivent aussi avoir une structure cristallographique non centrosymétrique pour que le barycentre des charges + et - ne coïncident pas.



Ce type de matériaux présente un cycle de polarisation orientant ces domaines avec une **polarisation à saturation**, une **polarisation rémanente**, un **champ coercitif**.

Propriétés diélectriques

Les **ferroélectriques** sont utilisés dans de nombreuses applications: actuateurs, capteurs, stockage permanent de données, etc.

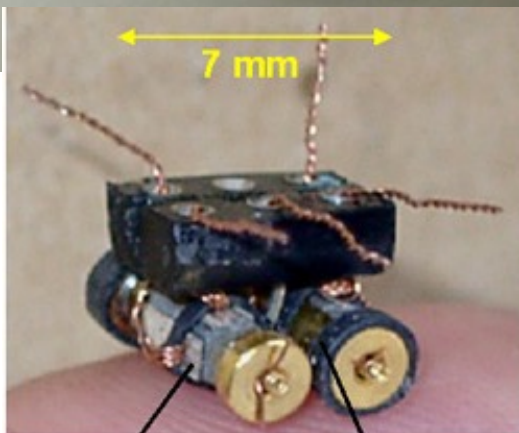
<http://www.presence-pc.com/tests/nram-zram-pram-feram-22658/2/>



http://www.ceatec.com/2008/en/exhibition/list/detail.html?exh_id=E080395



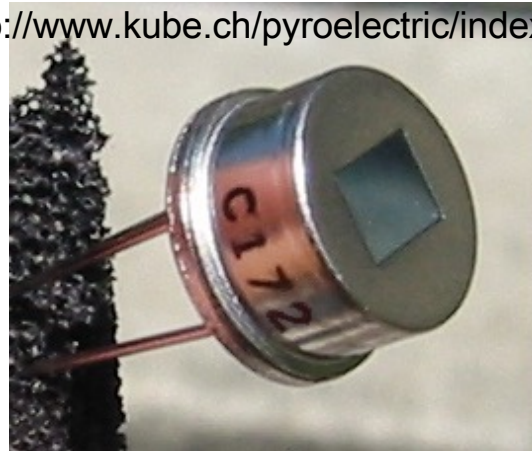
<http://www.crcpress.com/>



Motor 1

Motor 2

<http://www.kube.ch/pyroelectric/index.php>



Les **pyroélectriques** sont des matériaux dont la polarisation dépend de la maille, et donc de la température.

Résumé

- De nombreuses applications requièrent des matériaux certaines fonctions électriques.
- Les métaux sont des conducteurs, les polymères et les céramiques sont généralement des semi-conducteurs ou des isolants. On les caractérise par la conductivité et le potentiel disruptif, respectivement.
- Les semi-conducteurs ont des gaps d'énergie faible: isolants à faible température, ils peuvent acquérir une bonne conductivité électrique lorsque la température augmente.
- Les diélectriques (ou isolants) sont caractérisés par une constante diélectrique relative, ϵ_r .
- On peut distinguer des matériaux piézoélectriques, ferroélectriques ou pyroélectriques qui ont des structures non centro-symétrique leur permettant de garder une polarisation sous différents stimuli.

Découverte des effets magnétiques

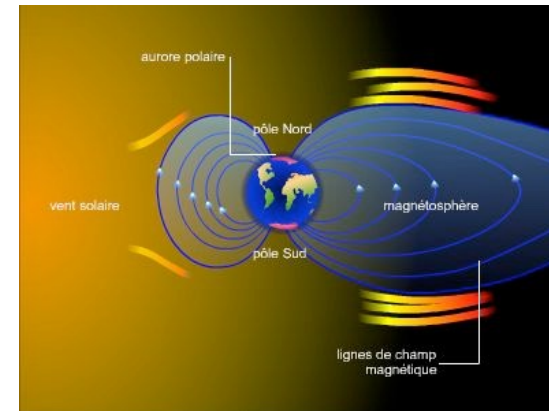
La première véritable observation des phénomènes de magnétisme est attribuée à Thalès de Milet (VI^{ème} s. avant J.C.)



Magnétite: Fe_3O_4 (pierre trouvée en Magnésie)

Attire certains matériaux: Fer, acier, Cobalt, Nickel...

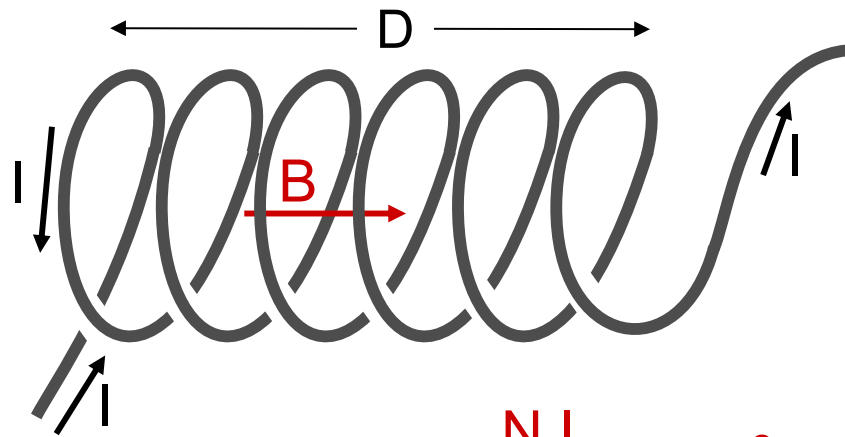
L'invention de la boussole au XI^{ème} siècle est la première utilisation pratique de la force magnétique



<http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/g%C3%A9omagn%C3%A9tisme/55127>

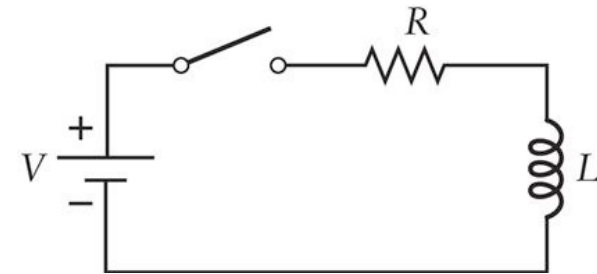
Induction magnétique

Un courant électrique crée un champ qui s'oppose à ce courant électrique: c'est ce qui gouverne l'inductance.



$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} = \mu_0 \frac{N I}{D} \text{ [Vs m}^{-2}\text{]}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs (Am)}^{-1}$$



$$V_L(t) = L \frac{di}{dt} = V - Ri$$

$$i(t) = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

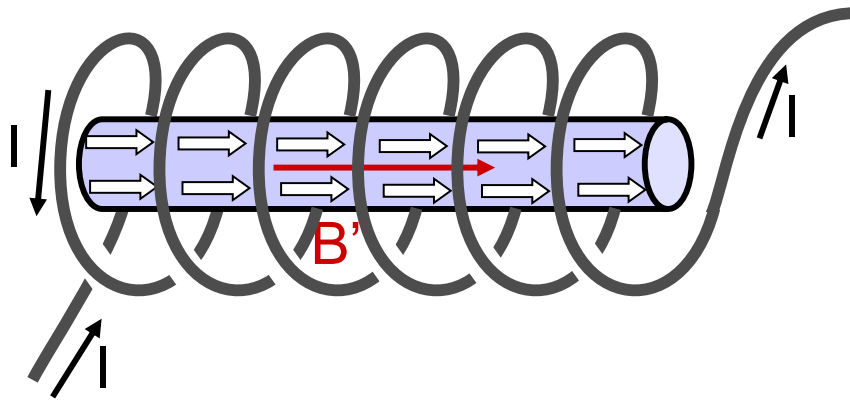
L est l'inductance mesurée en Henry (H)

Une bobine composée de N spires, sur une longueur D , où circule un courant I , génère dans le vide un **champ magnétique H** , et une **induction magnétique B** .

H est le champ magnétique: son unité est le A.m^{-1}

Origine des propriétés magnétiques

Que se passe-t-il si on met un matériau dans la bobine ? L'induction est différente selon la nature du matériau.



$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{D}$$

$$\mu_r = (1 + \chi_M) ; \mathbf{M} = \chi_M \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$$

Par analogie avec les dipôles électriques qui changent le champ électrique interne dans un diélectrique, il y a donc un **champ magnétique \mathbf{M}** , appelée **aimantation** (en A.m^{-1}), qui change le champ magnétique dans le matériau.

Le champ magnétique externe \mathbf{H} induit donc un champ magnétique (dit « induit ») \mathbf{B} dans le matériau qui prend en compte la contribution de l'aimantation créée.

χ_M est la **susceptibilité magnétique**, grandeur sans dimension directement liée à la perméabilité relative.

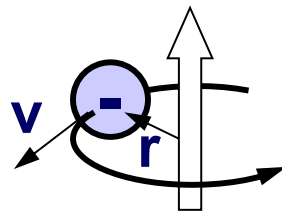
Moments magnétiques

Le champ électrique agit sur, et est créé par, des charges et des dipôles électriques.

Il n'y a pas de charge, ou monopôle, magnétique ! (Dans la théorie classique de l'électromagnétisme...)

Le champ magnétique agit sur, et est créé par, des charges en mouvement... ou des charges en « rotation » (notion quantique du spin).

On définit alors le **dipôle magnétique** comme une petite boucle de courant auquel on associe un **moment magnétique**, notion quantique élémentaire à l'origine des propriétés magnétiques des matériaux :



Parallèle avec le moment cinétique d'un électron:

$$\mathbf{L} = m_e \mathbf{r} \times \mathbf{v}$$

$$\mathbf{m} = \frac{-e}{2m_e} \mathbf{L}$$

Dipôle magnétique

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} q \mathbf{r} \times \mathbf{v} = i \mathbf{S}$$

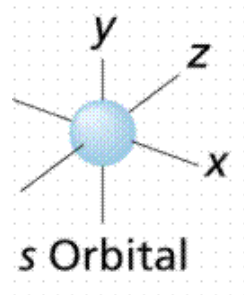
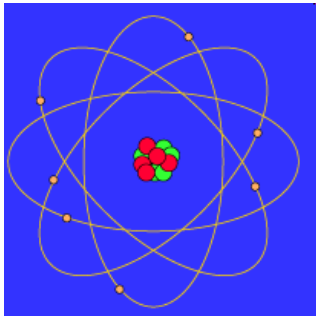
(vecteur) [Am²]

26 i : current in the loop; S : surface of the loop

Origine des propriétés magnétiques

Y-a-t il de tels moments, ou « boucles de courant » dans la matière ?

- **Le moment magnétique atomique**: les orbitales des électrons autour du noyau forment des moments magnétiques !

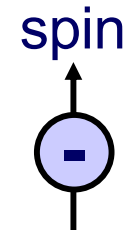


On avait vu la quantification de ces orbitales (nombre quantique magnétique) : $L_z = m_l \hbar$

$$m = m_l \mu_B \text{ avec } \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.274 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2$$

Magnéton de Bohr

- **Le moment magnétique de Spin**: le mouvement de rotation de l'électron sur lui même, la vision classique du spin, est un mouvement de charge circulaire auquel on peut associer un moment magnétique m_s



On définit alors le vecteur d' **Aimantation M** comme la somme de ces moments par unité de volume:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{V} \sum_i \mathbf{m}_i \text{ [Am}^{-1}\text{]}$$

Origine des propriétés magnétiques

Que se passe-t-il lorsque l'on applique un champ magnétique externe \mathbf{H} ?

- **Diamagnétisme**: Le champ \mathbf{H} perturbe les orbitales des électrons qui changent en créant un moment \mathbf{M} s'opposant à \mathbf{H} :

- La susceptibilité χ_d est **négative et faible** ($\approx -10^{-5}$)

$$\mathbf{M} = \chi_d \mathbf{H}$$

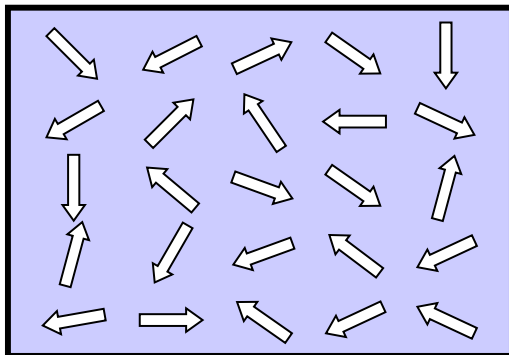
- Le champ \mathbf{H} **crée des dipôles**

- Ce phénomène est présent dans tous les matériaux mais ne domine pas forcément.

- **Paramagnétisme**: Le champ magnétique agit **sur des moments déjà existant** au niveau des atomes ou des électrons. Il les aligne le long de sa direction:

$$E = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}$$

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B})$$



- La somme sur les moments cinétiques et de spin suivant des règles de la mécanique quantique confère un **moment magnétique atomique** aux ions dans la matière plus ou moins important.
- Les électrons non liés aux atomes dans la couche de conduction (conducteurs électriques) ont un **moment magnétique dû au spin**
- Les matériaux à couches électroniques remplies (isolants) ont un moment magnétique atomique, et de spin, nuls.

Propriétés magnétiques: diamagnétisme

Un matériau placé dans un champ magnétique voit le mouvement de ses électrons affectés: cela induit un petit moment magnétique opposé au champ et donc $\chi_M < 0$ ($\sim -10^{-5}$): **diamagnétisme**.

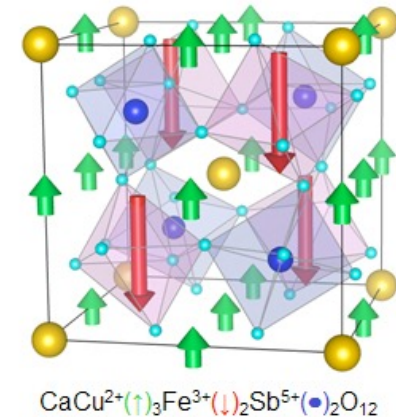
- Effet magnétique faible (χ_M reste petit) toujours présent;
- Ce magnétisme est **indépendant de la température**;
- Certains métaux, malgré un moment magnétique de spin des couches électroniques non remplies, restent diamagnétiques

Exemples de matériaux diamagnétiques

Matériaux	χ_m	Matériaux	χ_m
Al ₂ O ₃	-1.81×10^{-5}	Si	-0.41×10^{-5}
Cu	-0.96×10^{-5}	Ag	-2.38×10^{-5}
Zn	-1.56×10^{-5}	Au	-3.44×10^{-5}
Hg	-2.85×10^{-5}	NaCl	-1.41×10^{-5}

Matériaux Diamagnétiques

- Les non-métaux avec les couches électroniques complètes, ont un moment magnétique atomique et de spin nuls. Ils sont donc en grande majorité diamagnétiques
- Il y a cependant des exceptions: La Magnétite Fe_3O_4 par exemple !
- Le Ferrimagnetism est une propriété très complexe de certaines céramiques qui ont une aimantation permanente.



- Pour comprendre le diamagnétisme de Cu, Zn, Ag ou Au, il faut regarder leur configuration électronique.

	Z	3s	3p	3d	4s
Fe	26	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow	$\uparrow\downarrow$
Co	27	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ \uparrow \uparrow \uparrow	$\uparrow\downarrow$
Ni	28	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ \uparrow \uparrow	$\uparrow\downarrow$
Cu	29	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$	\uparrow

- Le Fer, le Nickel, le Cobalt ont un moment magnétique atomique dûe aux couches électroniques non remplies !

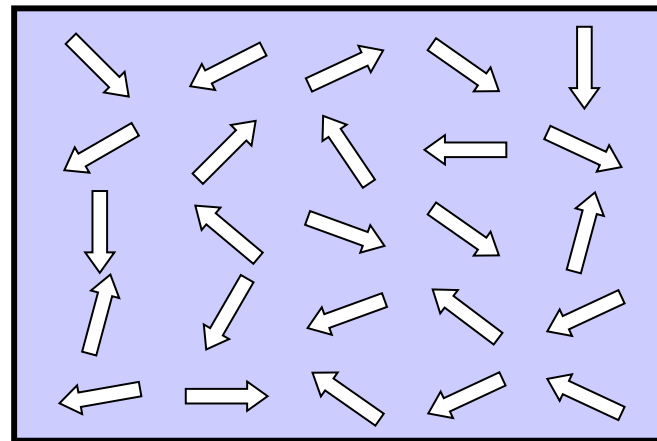
Propriétés magnétiques: paramagnétisme

Certains matériaux (terres rares, fer) ont un moment magnétique associé à chaque atome non nul. En présence d'un champ magnétique, ces moments s'orientent ($\chi_M > 0$): **paramagnétisme**.

Exemples de matériaux paramagnétiques

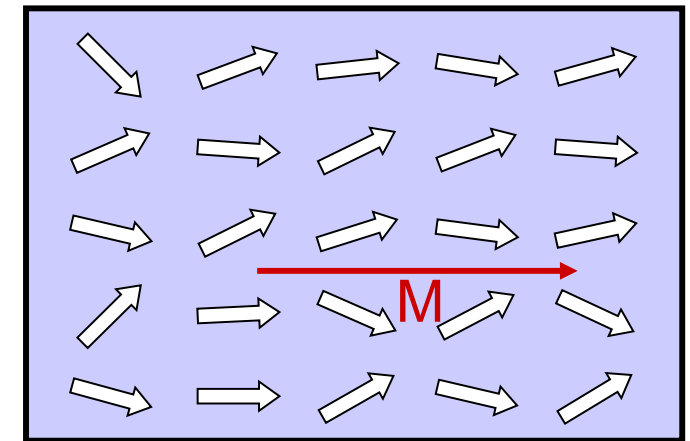
Matériaux	χ_m
Al	2.07×10^{-5}
Cr	3.13×10^{-4}
ClCr	1.51×10^{-3}
Mo	1.19×10^{-4}
Na	8.48×10^{-6}
Ti	1.81×10^{-4}

Energie potentielle d'un moment \mathbf{m} dans un champ \mathbf{B} : $E = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}$



$$H = 0$$

$$M = 0$$



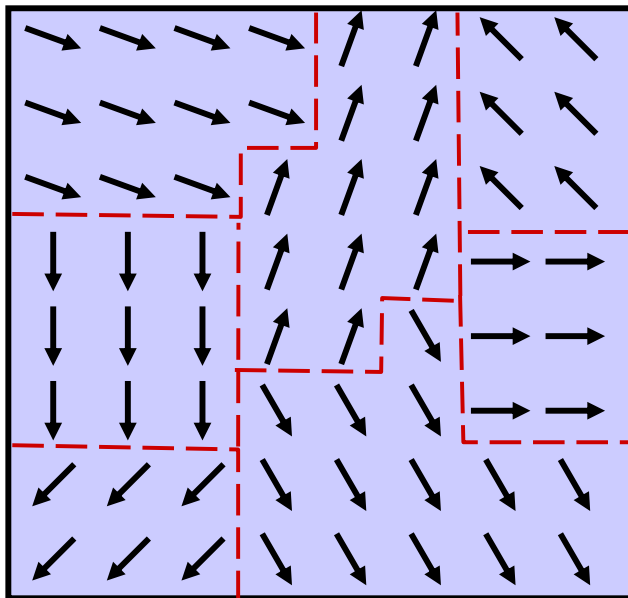
$$H \neq 0$$

$$M = \chi_M H \quad F = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B})$$

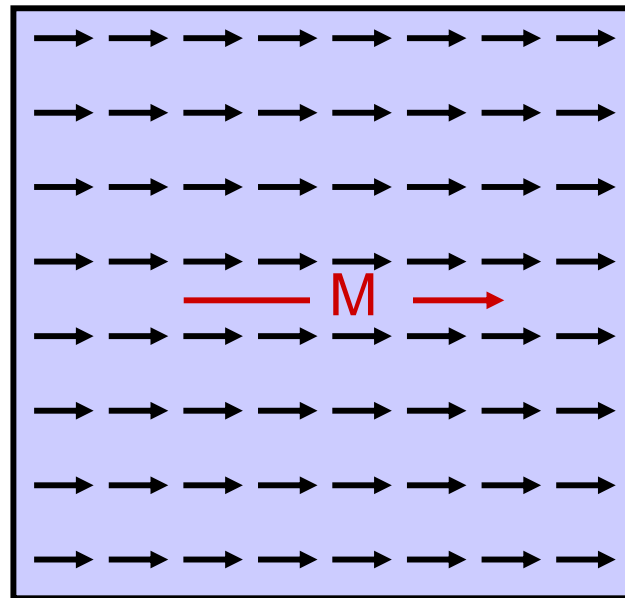
Un aimant va donc attirer un matériau paramagnétique

Propriétés magnétiques: ferromagnétisme

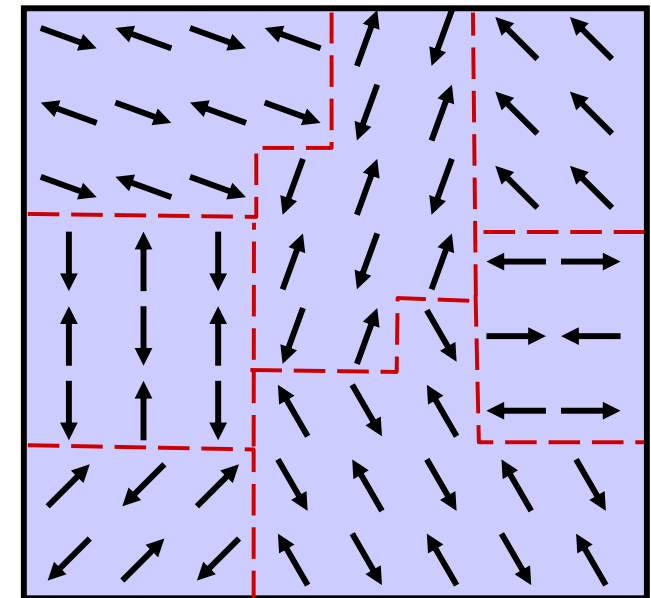
En dessous de la **température de Curie** d'un matériau paramagnétique, celui-ci peut devenir **ferromagnétique** (ou **anti-ferromagnétique**): il présente des **domaines de Weiss** dans lesquels les moments magnétiques sont tous orientés, même avec $H = 0$.



Ferromagnétique
 $H = 0 ; M = 0$



Ferromagnétique
 $H ; M = \chi_M H$

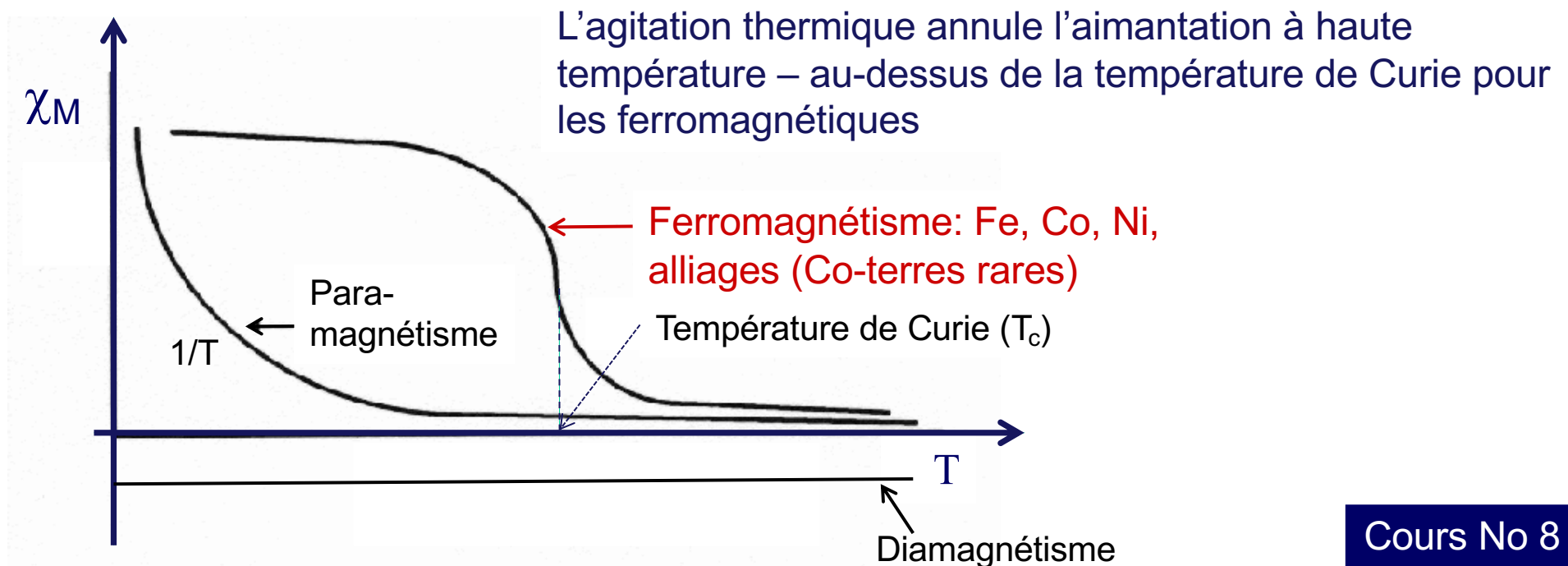


Anti-ferromagnétique
 $H = 0 ; M = 0$



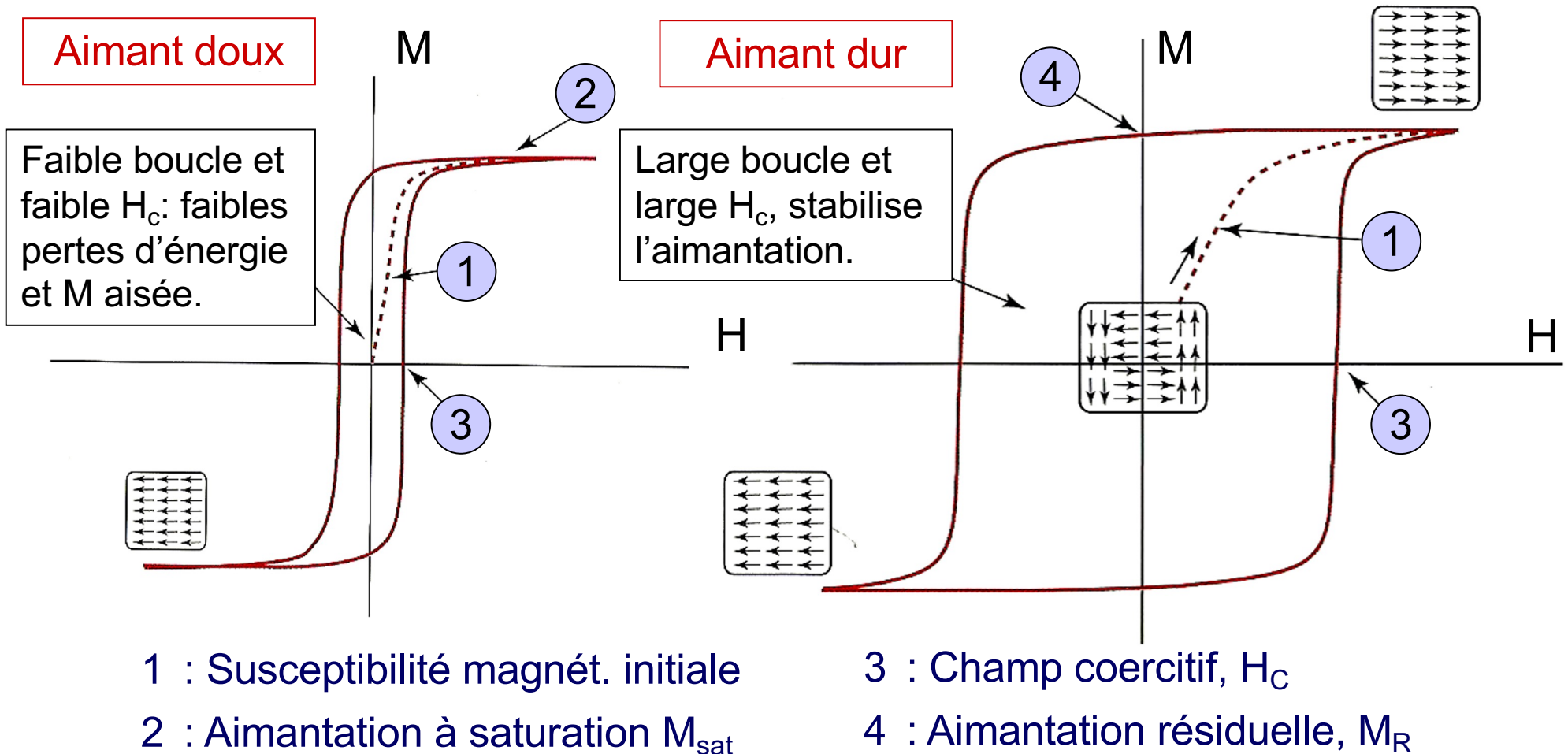
Propriétés magnétiques: ferromagnétisme

- Les propriétés ferromagnétiques proviennent de l'interaction des moments magnétiques atomiques (surtout dûs au spin) entre eux.
- Ces interactions s'étendent sur les domaines de Weiss.
- Les susceptibilités magnétiques peuvent atteindre 10^6 . L'aimantation magnétique est alors bien plus grande que \mathbf{H} , et l'induction magnétique $\mathbf{B} \approx \mu_0 \mathbf{M}$
- Le paramagnétisme et ferromagnétisme dépendent de la température



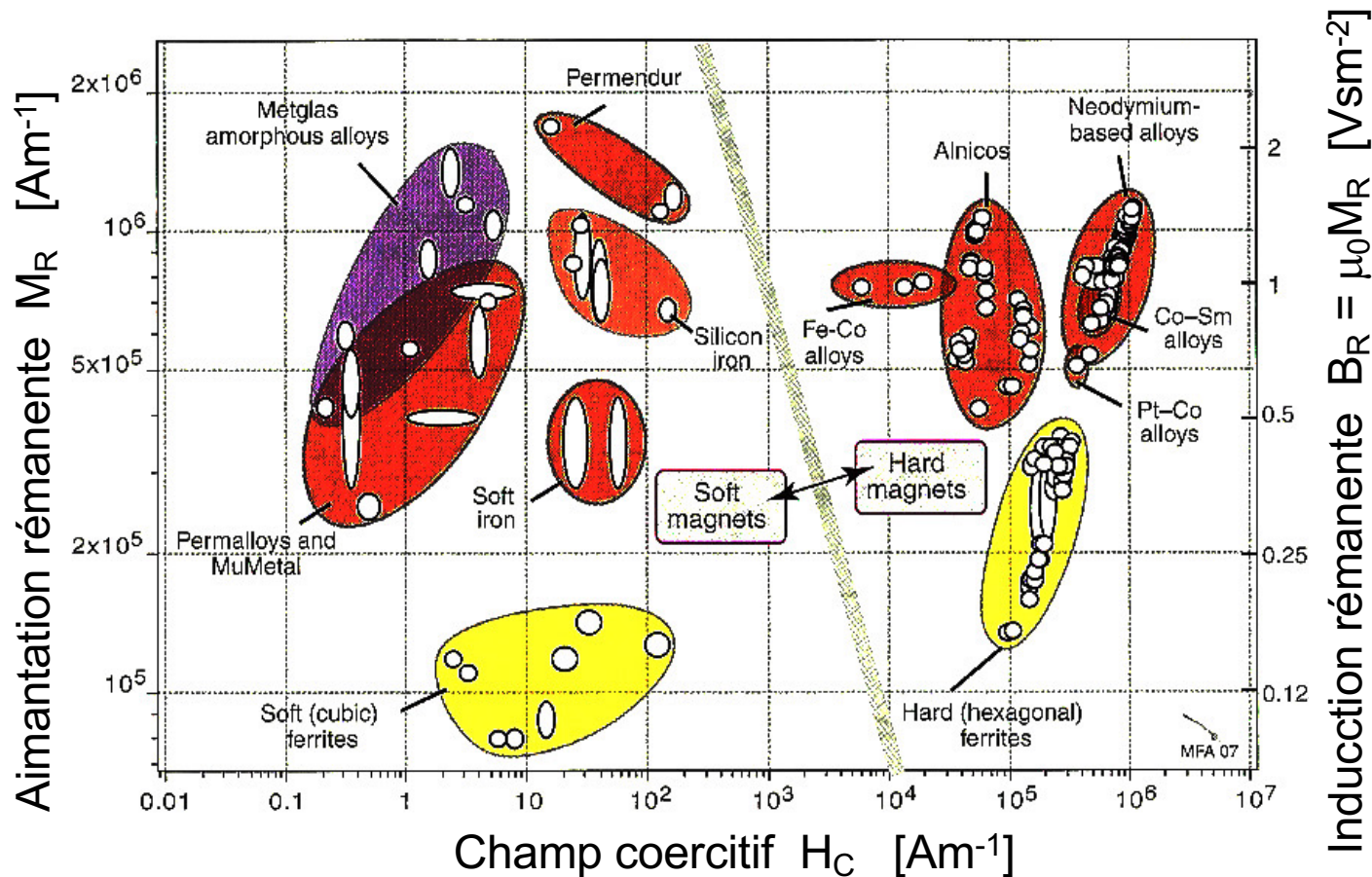
Cycles d'hystérèses

Les ferromagnétiques présentent une **courbe d'hystérèse** lorsque l'on applique un champ magnétique H .



Propriétés magnétiques

Propriétés magnétiques de quelques ferromagnétiques.



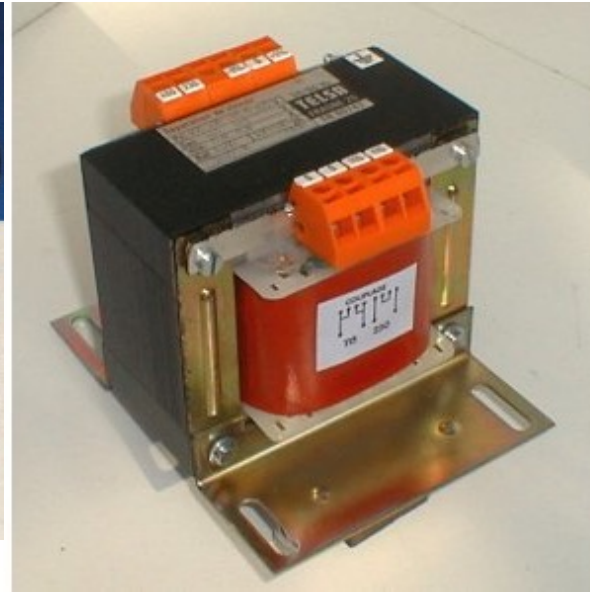
Système	B [T]
Terre	5×10^{-5}
Petit aimant ferrite	$2-4 \times 10^{-1}$
Aimant Fe-Nd-B	1
Gros électro-aimant	1.5
IRM	1-11.7 (!)
Etoiles magnétiques	10^{10}

Force: un aimant de 2.5 cm induisant un champ de 1 T peut soutenir environ 20kg de Fe par exemple. $F \propto B^2/\mu$

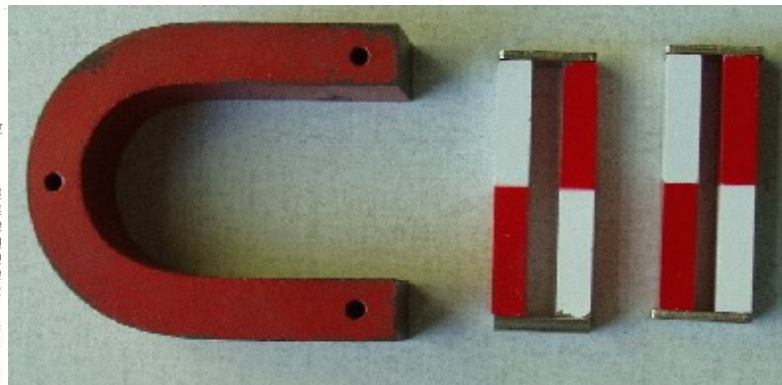
Propriétés magnétiques

Les applications des ferromagnétiques sont nombreuses:

Aimant doux

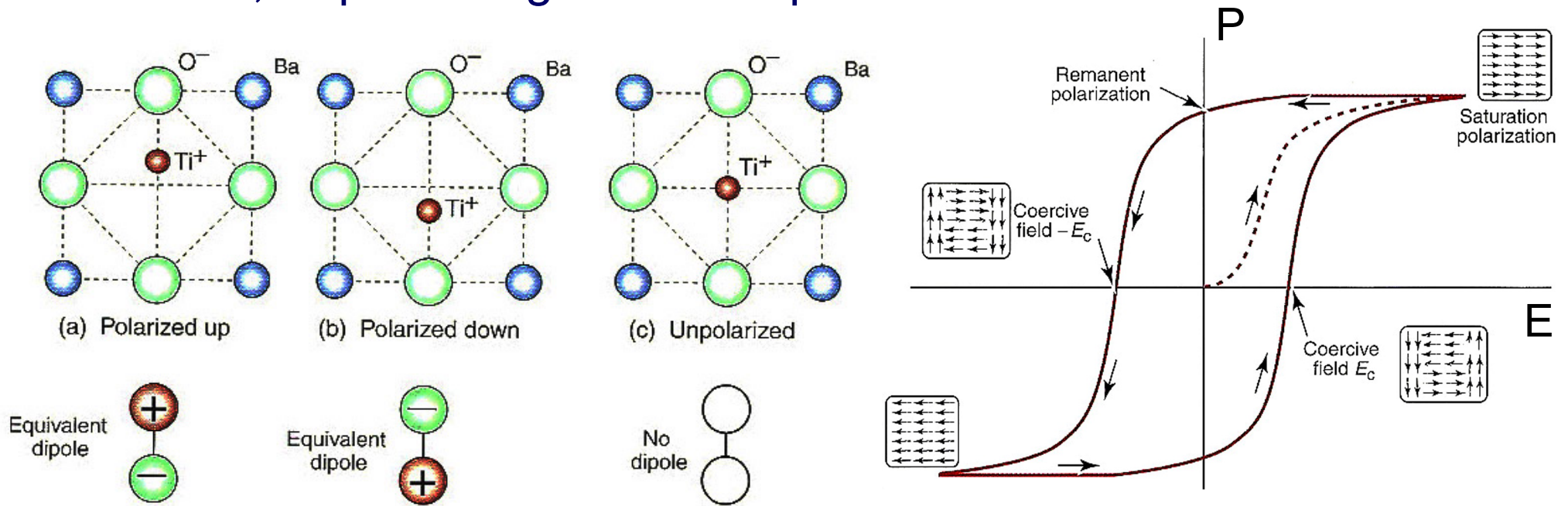


Aimant dur



Propriétés diélectriques

Les **ferroélectriques** tels que BaTiO_3 , ont un dipôle réversible que l'on peut orienter dans un champ E : en dessous d'une température de Curie, ils peuvent garder leur polarisation.



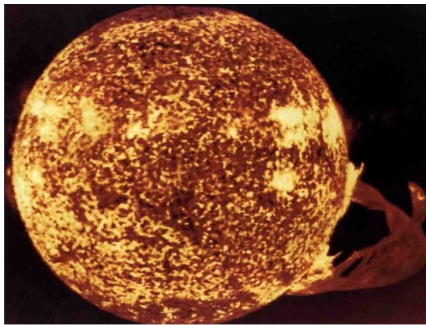
Comme les ferromagnétiques, ce type de matériaux présente un cycle de polarisation orientant ces domaines avec une **polarisation à saturation**, une **polarisation rémanente**, un **champ coercitif**.

Résumé

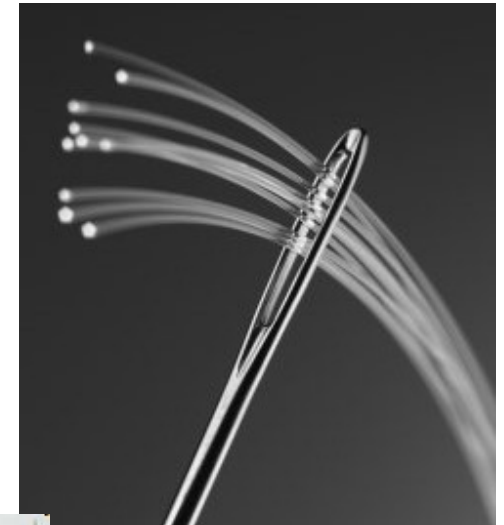
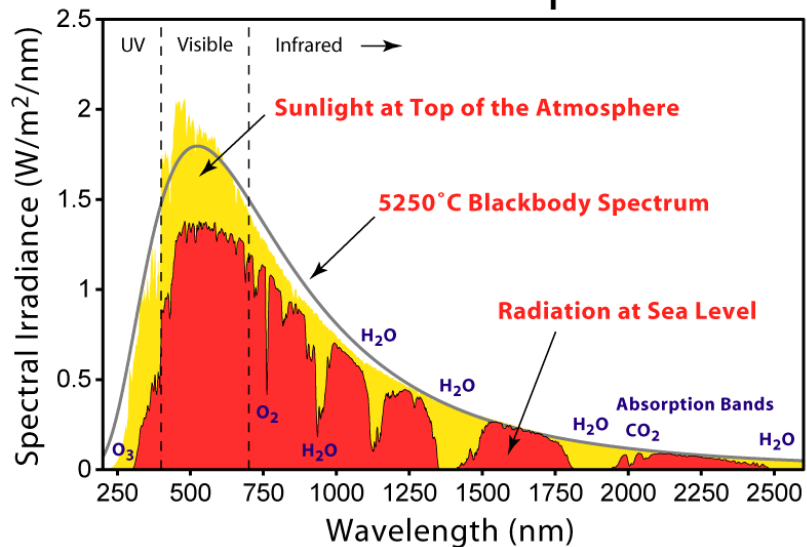
- De nombreuses applications requièrent des matériaux des fonctions magnétiques.
- Les moments magnétiques peuvent se représenter par des « boucles » de courant. L'aimantation d'un matériau est la somme de ces moments (moments atomiques, de spin) par unité de volume.
- Les matériaux diamagnétiques sont dominés par la réponse des orbitales des électrons au champ externe. Ils ont une susceptibilité magnétique négative très faible ($\approx -10^{-5}$)
- Les matériaux paramagnétiques ont un moment magnétique non nul qui domine l'aimantation due au diamagnétisme. Ils ont alors une susceptibilité positive.
- Les ferromagnétiques ont, au dessous de la température de Curie, une aimantation permanente (à champ externe nul).
- Des cycles d'hystérèse mettent en lumière les phénomènes de dissipation d'énergie lors de cycles, les aimants durs ayant de fortes pertes comparés aux aimants doux.

Introduction

Les **propriétés optiques** des matériaux, même si elles sont de nature électro-magnétique, sont classées à part vu leur importance et leurs vastes champ d'applications.

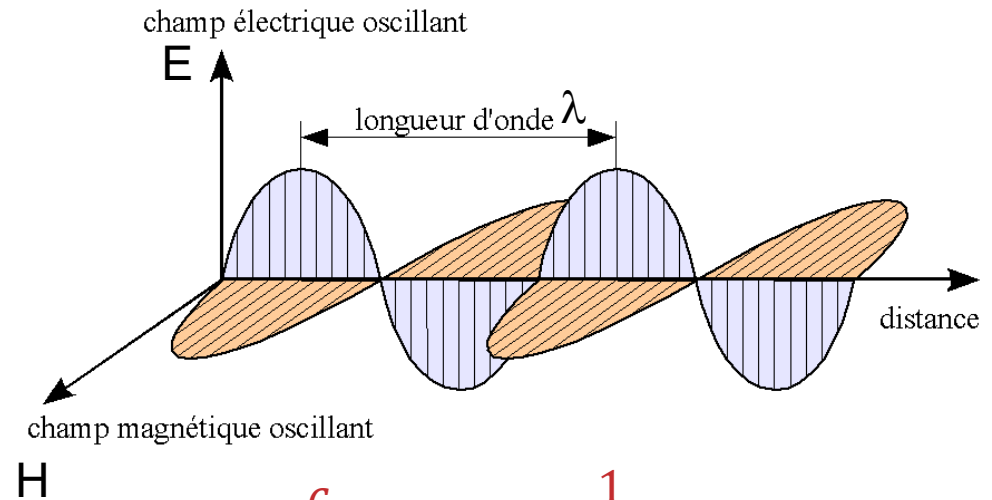
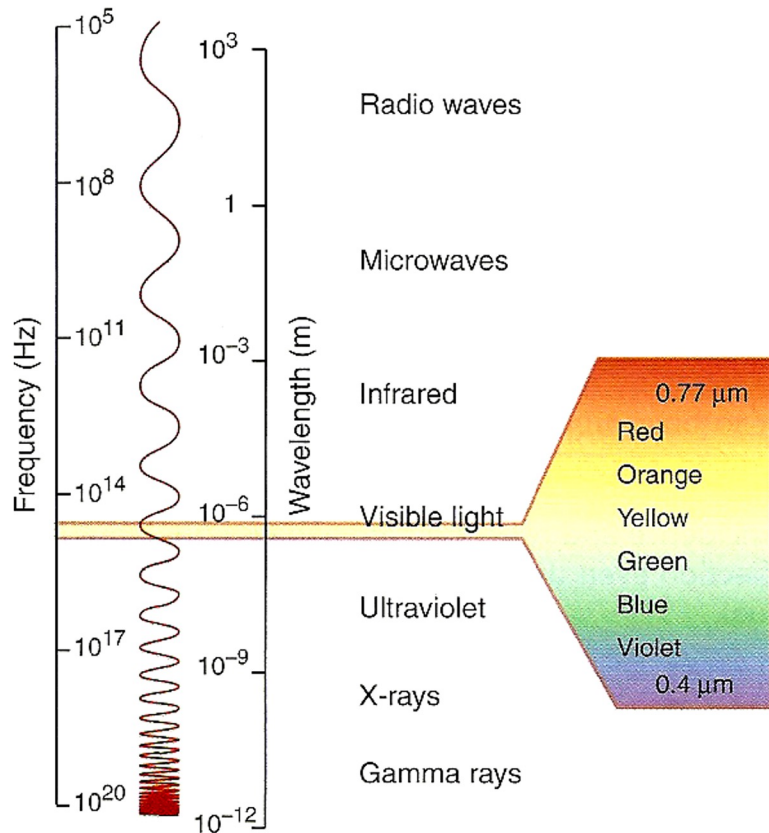


Solar Radiation Spectrum



Propriétés optiques

La lumière visible est une **onde électromagnétique** dont la longueur d'onde λ est située dans la gamme de sensibilité de notre œil (400-800 nm).



$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\nu = 3.75 - 7.5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

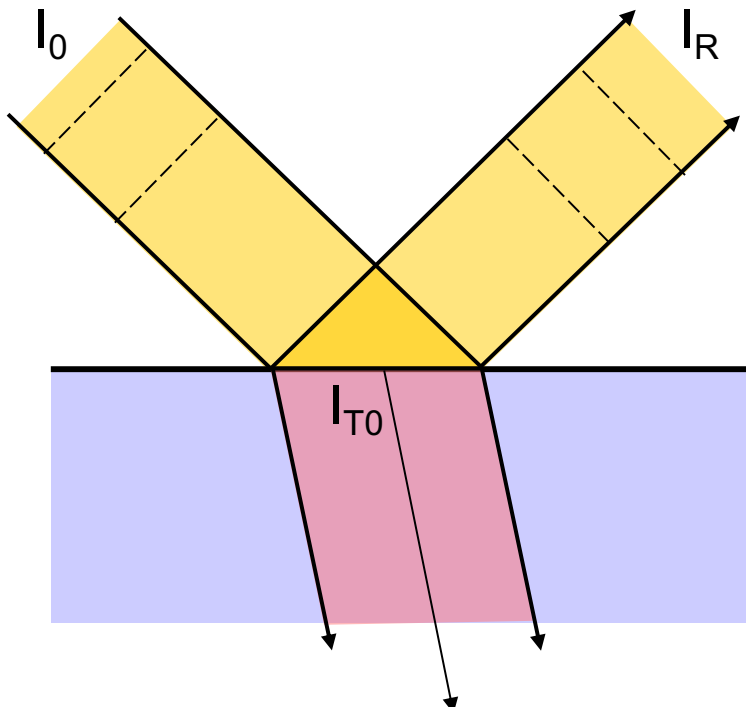
$$E = 1.25 - 2.5 \text{ eV}$$

Les propriétés optiques des matériaux correspondent à leur réponse à des excitations électromagnétiques à des fréquences supérieures à $10^{12} - 10^{13} \text{ s}^{-1}$.

Propriétés optiques

Lorsqu'une onde lumineuse arrive sur un matériau, le champ électromagnétique interagit avec les e^- de la matière ainsi qu'avec les atomes ou molécules. Il y a un échange d'énergie entre le champ et la matière.

- **Absorption électronique**: le champ électromagnétique fait osciller les électrons (libres ou liés (dipôles));
- **Absorption vibrationnelle**: l'onde peut aussi exciter des « modes de vibration » du crystal (phonons), des liaisons ou des molécules présentes.



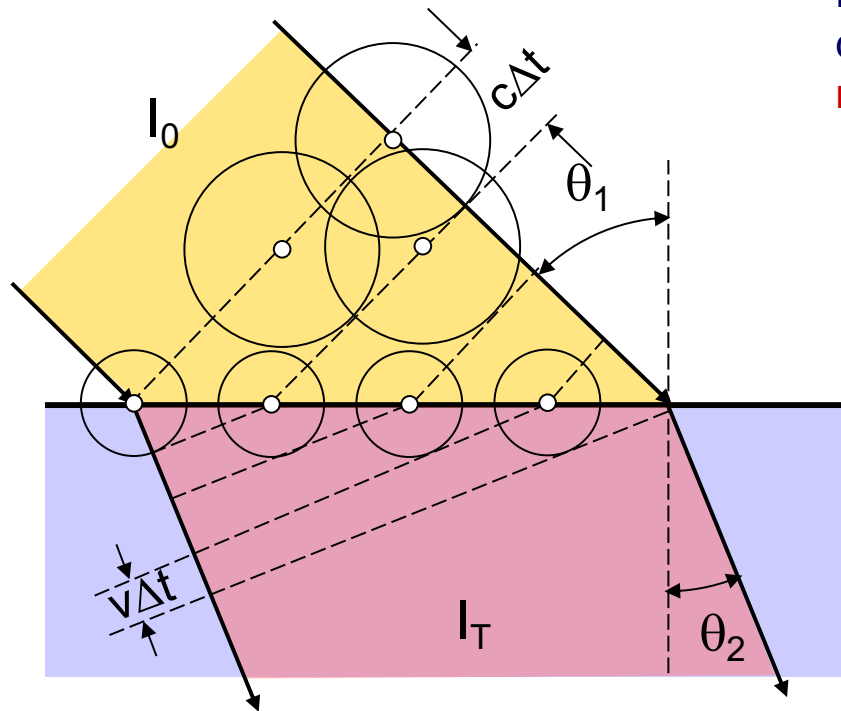
Incidente sur un matériau, selon sa fréquence et la nature du matériau, l'intensité incidente I_0 est alors:

- partiellement **réfléchi**
- partiellement **transmise et réfractée**.
- Partiellement **diffusée**
- Partiellement **absorbée**
- Elle peut **interférer**
- Et d'autres effets plus rares et compliqués...

Propriétés optiques: indice de réfraction

Dans la partie transmise, la vitesse de propagation de l'onde est différente: ceci induit une **réfraction** de la lumière.

La fréquence f restant constante, c'est la longueur d'onde qui varie dans le matériau, avec la définition de l'**indice de réfraction n** , qui dépend de f :



$$n(f) = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{\text{air}}}{\lambda_{\text{mat}}}$$

D'où la loi de la réfraction:

$$\frac{c}{\sin \theta_1} = \frac{v}{\sin \theta_2}$$

ou

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$$

On a alors $n = c/v = (\epsilon_r \mu_r)^{1/2}$, ce qui exprime le couplage entre **E** et **H**.

-Aux fréquences optiques, la réponse des para- et ferromagnétiques sont trop lentes pour suivre les variations du champ. La susceptibilité magnétique devient très faible et $\mu_r \approx 1$.

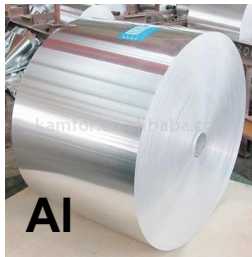
42 -l'indice de réfraction varie alors approximativement comme $\epsilon_r^{1/2}$

Propriétés optiques: métaux

Dans le cas des **métaux**, la lumière va exciter le bain d' e^- libres et est absorbée sur de très courtes distances en faisant osciller les électrons. Cette oscillation ré-émet un faisceau de même fréquence, d'où une forte réflexion.

Si la fréquence du signal est trop élevée, les électrons ne peuvent plus suivre l'oscillation du champ. Les métaux peuvent alors devenir transparent au dessus d'une certaine fréquence.

acier
inox



Al



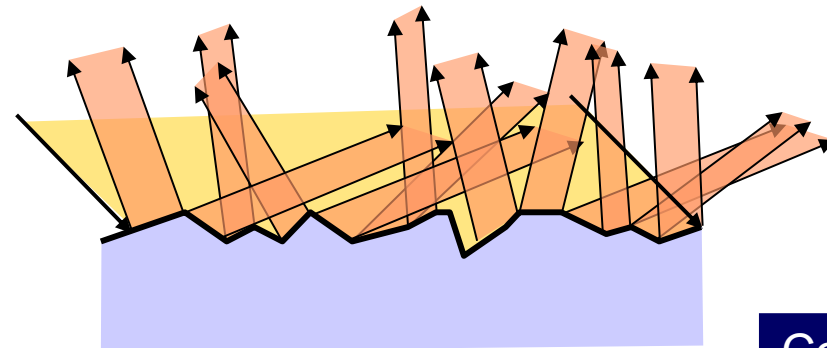
Cu



Au

En mécanique quantique, cette oscillation est interprétée comme un transfert des électrons libres vers des états d'énergie plus élevée. En revenant à leur état initial, ils émettent un photon, origine de la réflexion.

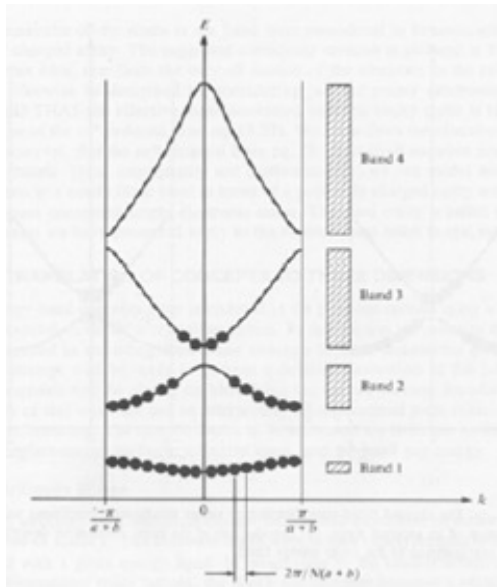
La lumière est bien réfléchi sur une surface métallique polie, aspect miroir. Lorsque la surface est dépolie (rugueuse), la lumière est **diffusée**, aspect mat.



Propriétés optiques: semi-conducteurs

La lumière peut par contre pénétrée dans les semi-conducteurs et les isolants. Le gap d'énergie introduit pour les propriétés électriques joue encore ici un rôle crucial:

- Les semi-conducteurs réfléchissent une partie d'une onde incidente du fait de leur indice optique bien supérieur à 1.
- Une partie cependant peut être absorbée, si l'énergie des photons ($\hbar\omega$) est suffisante pour exciter un électron de la bande de valence vers la bande de conduction:



Absorption si $\hbar\omega \geq E_g$

La partie transmise va s'atténuer avec la distance par **absorption**:

Loi de Lambert-Beer : $I_T(x, \lambda) = I_{T0}(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)x)$

$\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption [m^{-1}]

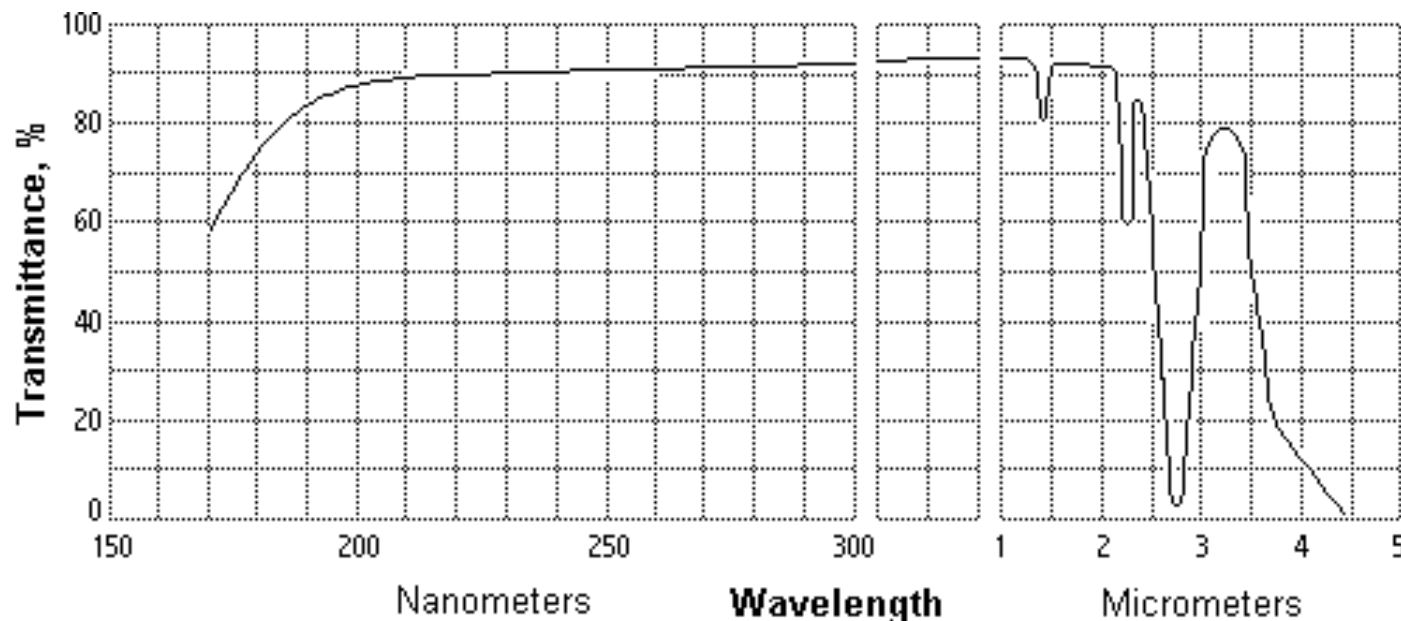
Propriétés optiques: diélectriques

On comprend alors que la plupart des diélectriques sont **transparents**:

- Leur gap d'énergie étant supérieure à l'énergie des photons dans le visible, ceux-ci ne sont pas absorbés et sont donc transmis.

- Aux longueurs d'onde plus faibles dans l'infrarouge (IR) certaines fréquences sont absorbées car elles correspondent aux fréquences de vibrations des liaisons, du cristal ou des molécules.

Spectre de transmission de la silice (10 mm d'épaisseur)



Propriétés optiques

La plupart des diélectriques sont **transparents**, mais peuvent absorber sélectivement une fréquence lorsque l'énergie correspond précisément à une transition d'un niveau électronique à un autre, par exemple lorsqu'ils sont dopés avec des impuretés.



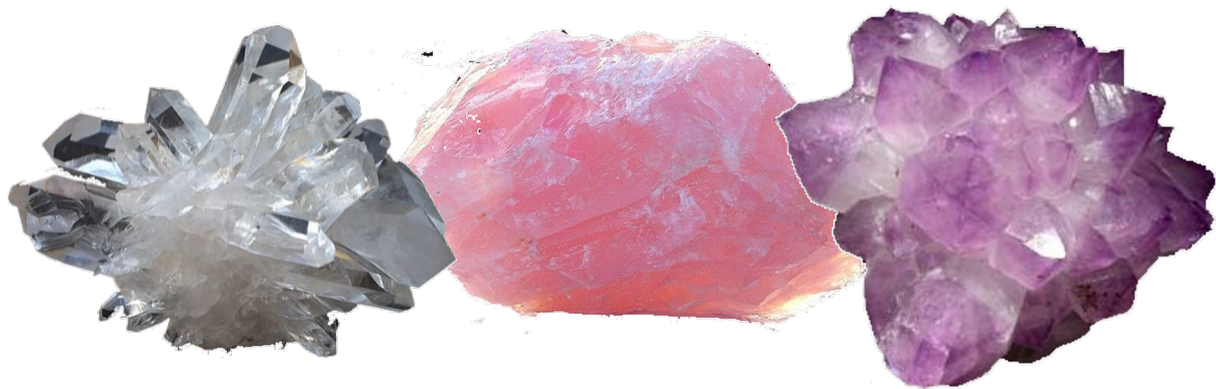
Corindon dopé (Al_2O_3)
avec divers éléments

Rouge : Cr (rubis)

Bleu: Ti, Fe (saphire)

Violet: V

Jaune: Fe



Quartz (SiO_2),
quartz rose et
améthyste

Propriétés optiques

Lorsque des particules en suspension ont une taille comparable à la longueur d'onde, cela influence la **diffusion de la lumière** (ici, suspension de CdSe).

<http://www.webexhibits.org/causesofcolor/9.html>

Une couche d'oxyde sur la surface d'un alliage titane crée des **interférences** similaires à la diffraction.

http://pat-et-do-chevalier.fr/couteaux_industriels.htm

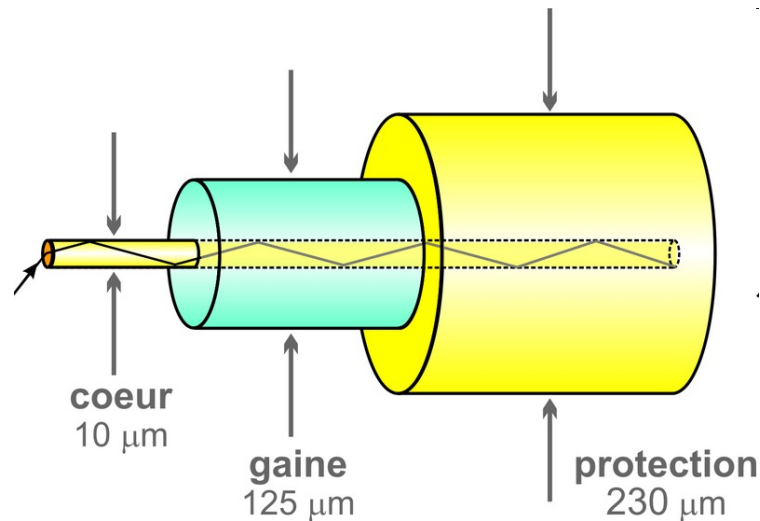
Un matériau transparent constitué de grains diffuse la lumière et devient **tranlucide**.

P. Bowen, <http://ltp.epfl.ch/page71046-fr.html>



Propriétés optiques: fibres optiques

Les **fibres optiques en silice** permettent de transmettre à la vitesse de la lumière de l'information sur de grandes distances.



$$\alpha_{\text{dB}} [\text{dB/km}] = \frac{-10}{x} \log \frac{I(x)}{I_0} = (10 \log e) \alpha [\text{km}^{-1}]$$

Année	dB/km	λ (nm)
1970	20	
1974	2 - 3	1 060
1976	0.47	1 200
1979	0.20	1 550
1986	0.154	1 550
2002	0.1484	1 570

http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique

$$3 \text{ dB} : I \cong 0.5 I_0$$

Fibre à saut d'indice: l'indice de réfraction change brutalement entre le cœur et la gaine. Le cœur a un indice plus élevé que la gaine: réflexion totale interne.

Résumé

- Les ondes lumineuses sont des ondes électromagnétiques qui interagissent aussi avec les e^- de la matière: il faut distinguer réflexion, transmission, réfraction, absorption, diffusion, diffraction...
- Les métaux sont opaques car toute lumière incidente excite le bain d'électrons et se trouve ainsi absorbée sur une profondeur très faible (quelques nanomètres). Cette excitation réémet une onde électromagnétique de même fréquence, d'où la forte réflexion des métaux.
- Les isolants diélectriques sont en général transparents car leur gap d'énergie est trop grand pour que la lumière visible puisse exciter un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Les longueurs d'onde plus grandes dans l'Infrarouge (IR) peuvent cependant être absorbées en excitant des modes de vibrations des liaisons ou des molécules.
- Si ces matériaux sont dopés, des niveaux d'énergie situés dans ce gap vont alors créer une absorption dans le visible et leur donner une couleur.
- Les semi-conducteurs ont un gap d'énergie qui correspond à l'énergie de la lumière visible. Si un photon a une énergie plus grande que ce gap, il peut être absorbé par l'excitation d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction.