Génie mécanique

# Cours No 14.1
# Propriétés électriques et magnétiques

**V. Michaud**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**

EPFL

# Table des matières

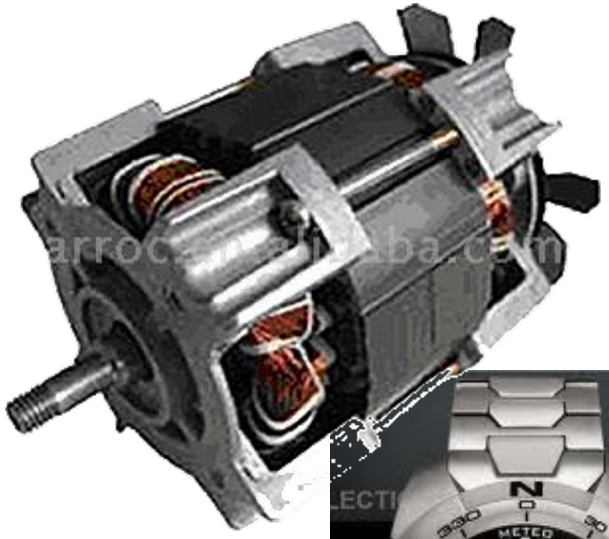

- Introduction
- Charges et dipôles électriques/moment magnétique
- Conductivité électrique des métaux
- Propriétés diélectriques
- Propriétés magnétiques

# Objectifs du cours

- Pour finir notre aperçu des matériaux, voici quelques propriétés fonctionnelles des matériaux. Les propriétés électriques et magnétiques proviennent aussi de la composition et de la microstructure des matériaux, et sont utiles pour beaucoup d'applications (isolants/conducteurs, aimants permanents/aimants doux)
- Ces propriétés sont aussi importantes lors de la sélection des matériaux.

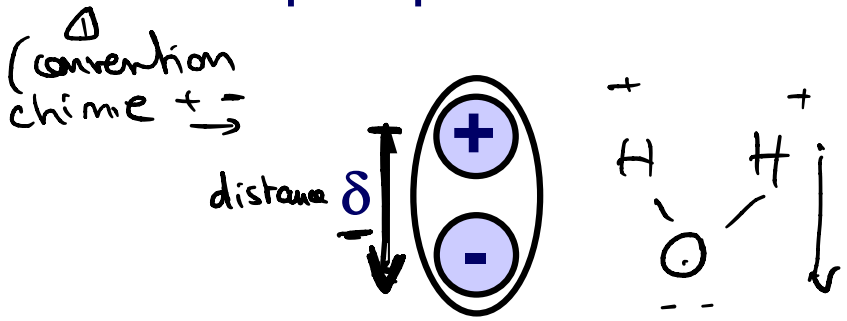
# Introduction

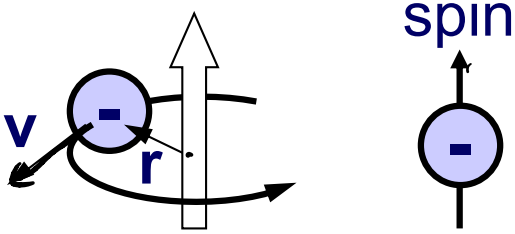
De plus en plus de matériaux sont utilisés pour leurs **propriétés fonctionnelles**, notamment électriques et magnétiques, tout en devant posséder certaines caractéristiques mécaniques.



# Charges, dipôles et moments magnétiques

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




**Charge**

$\pm q$ [A.s]

(1C=1A.s)

**Dipôle électrique**

$\vec{p} = q\vec{\delta}$ (vecteur)

unités A.s.m

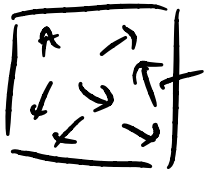
**Dipôle magnétique**

$\vec{m} = \frac{1}{2} q\, r \times v$ → vitesse

↳ rayon

A.m²

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



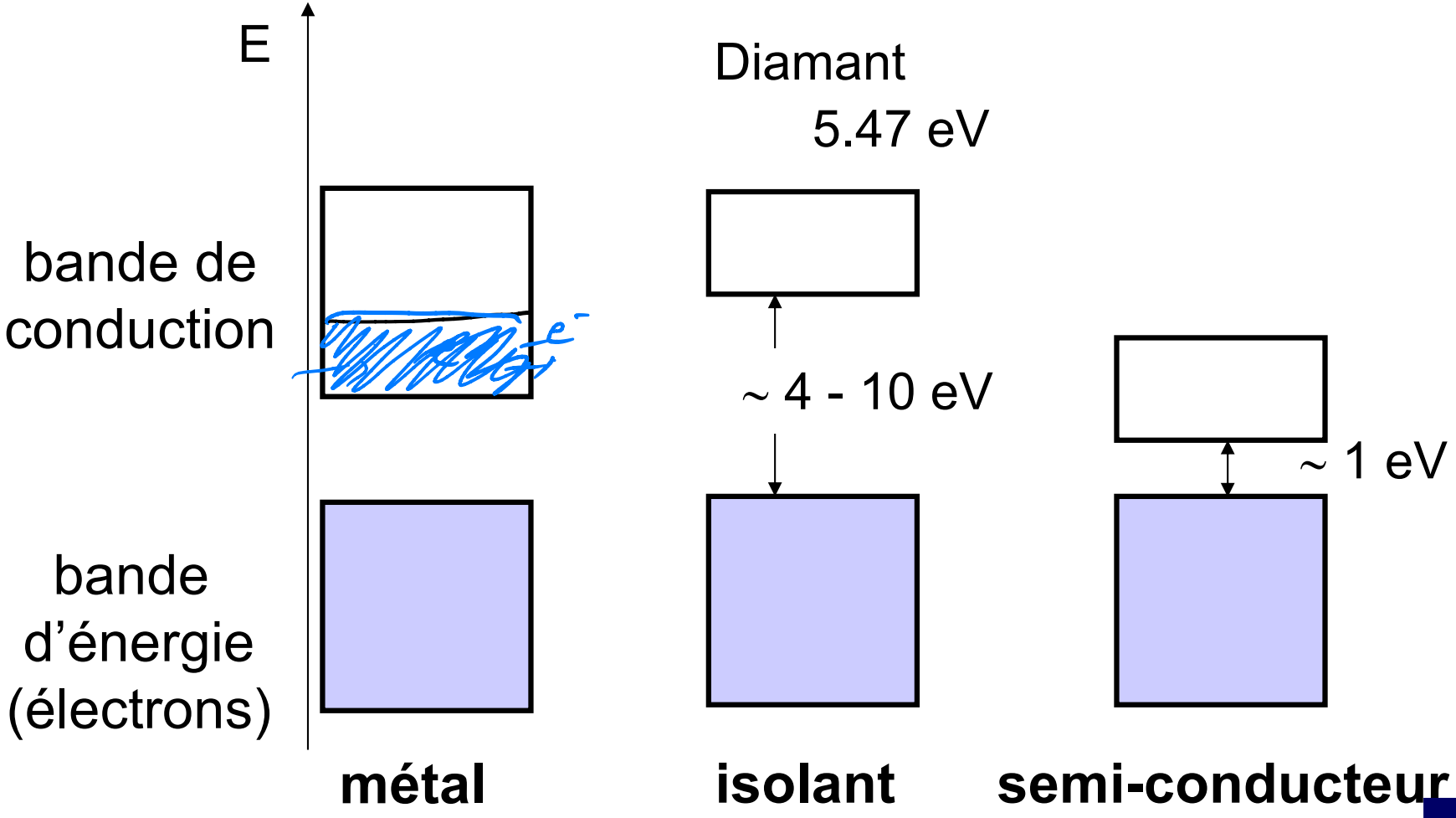
$$\vec{P} \quad P = \frac{1}{V} \sum \vec{p}_i \quad [A\,s\,m^{-2}]$$

volume

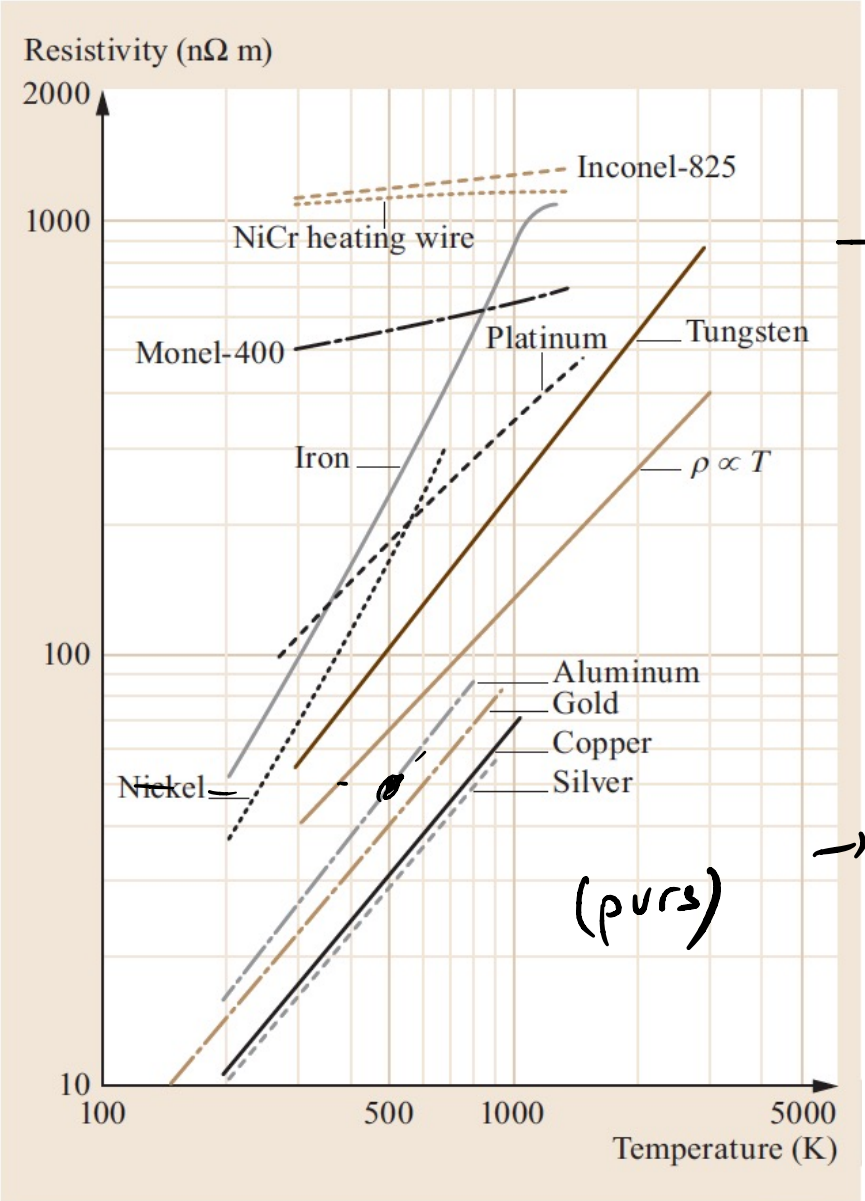
$$M = \frac{1}{V} \sum m_i \quad [A \cdot m^{-1}]$$

# Conductivité électrique

Comme vu dans les cours au sujet de la table périodique des éléments et la structure des atomes, certains atomes ont des électrons peu liés, qui pourront facilement circuler entre les atomes.



# Conductivité électrique des métaux



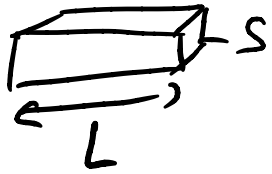

→ résistants

→ conducteur

(purs)

$\rho_e$ = résistivité → donnée du matériau

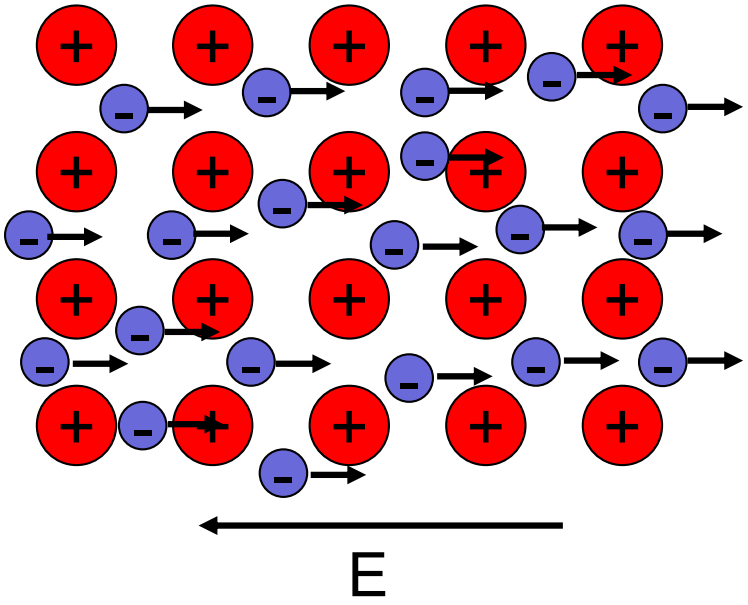
Résistance $R = \rho_e \frac{L}{S}$ ← longueur ← surface




$R\ [\Omega mm/m^2 = \Omega]$

# Conductivité électrique des métaux

Les **métaux conduisent l'électricité**, i.e., il y a déplacement des électrons libres dans la bande de valence 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 +, qui dépend de la masse de l'électron et d'un temps caractéristique $\tau$ des collisions sur les atomes (trouvé de manière empirique).

$v$ : vitesse de l'électron

$$F_{Totale} = qE - \text{friction} = m_e \frac{d\vec{v}_e}{dt}$$

$$q = -e$$

↑ charge d'1 électron

$$F_{Totale} = qE - \frac{m_e v_e}{\tau}$$

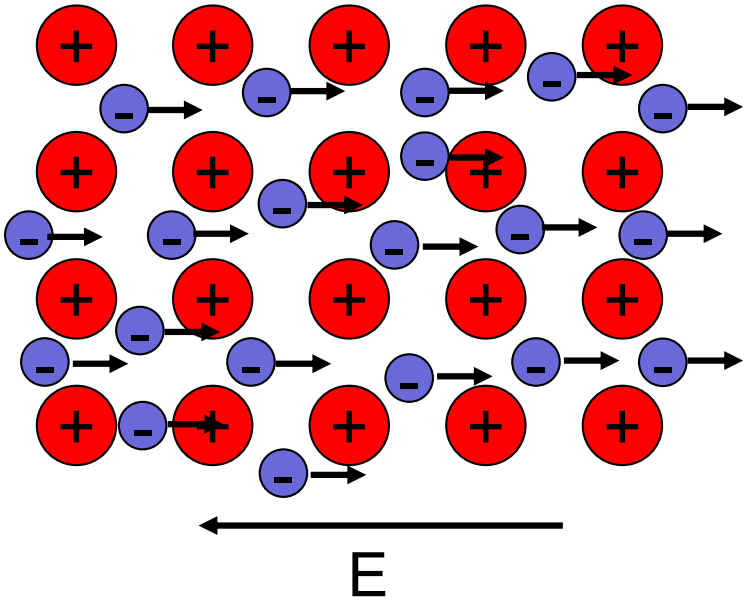
$\tau$ : temps caractéristique

Régime permanent $\frac{dv_e}{dt} = 0$

$$v_e = \frac{qE\tau}{m_e}$$

# Conductivité électrique des métaux

exemple Alu: 1 $e^-$ libre par atome $\rho_{Al} = 2.7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $M_A = 27 \text{ g/mol}$




S'il y a $n_e$ électrons par $m^3$, la densité de courant $\mathbf{j}_e$ passant dans le conducteur est finalement donnée par:

$$j_e = n_e \times (-e)\, v_{electron}$$

$$= \frac{n_e(-e)(-e)\, E\, \tau}{m_e}$$

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

$\sigma_e$ : conductivité électrique

$$n_{Atome\,Al/cm^3} = \frac{N_A \rho_{Al}}{M_A} = 6.02\ 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$$

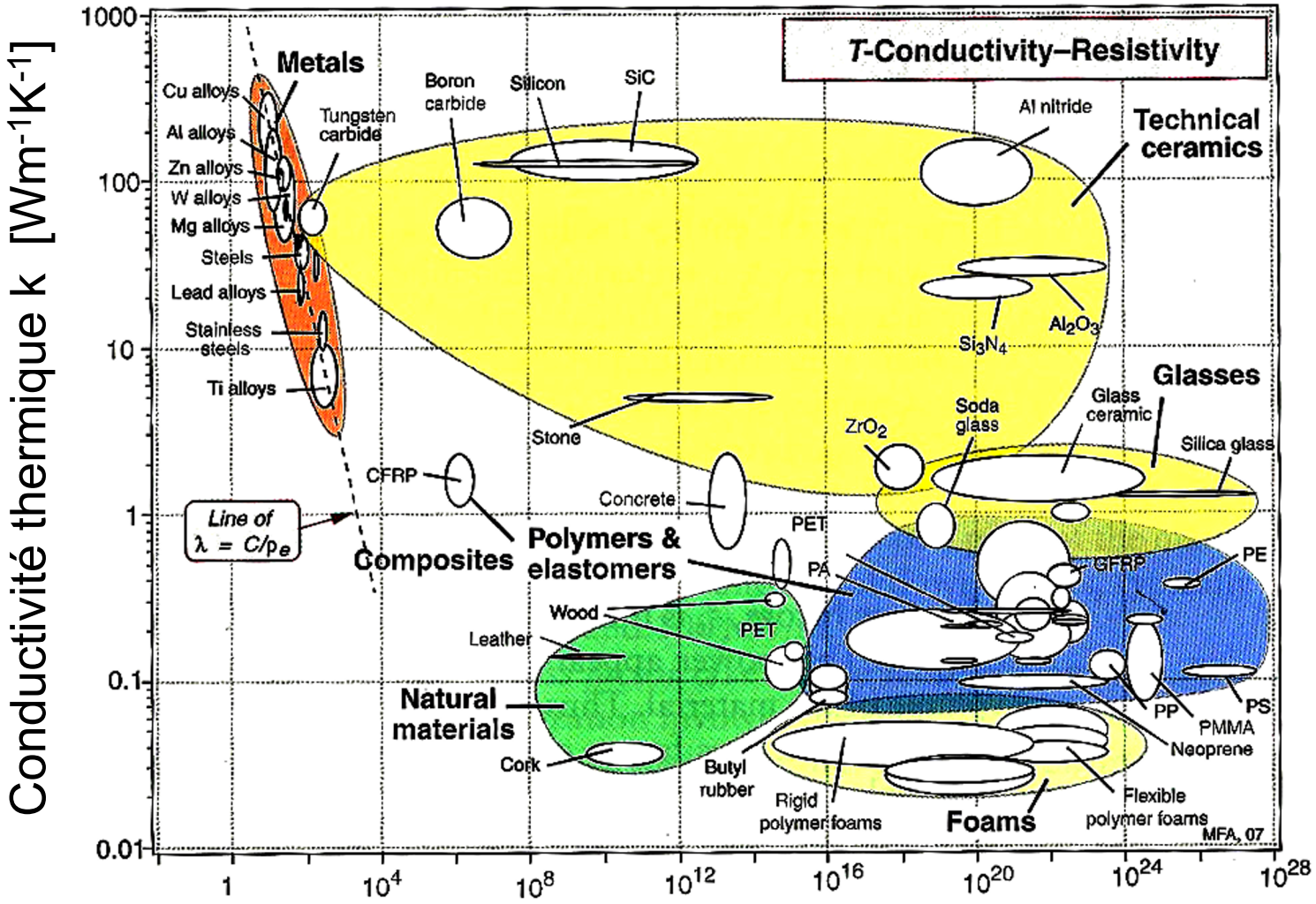
$$n_{electrons\ mobile/cm^3} = 6.02 \cdot 10^{22}\ e^-/\text{cm}^3$$

$$\boxed{\rho_e = \frac{m_e}{n_e e^2 \tau}} \simeq 50\ n\Omega m$$

$\tau \simeq$ estimé à $10^{-14}$ s à T donné

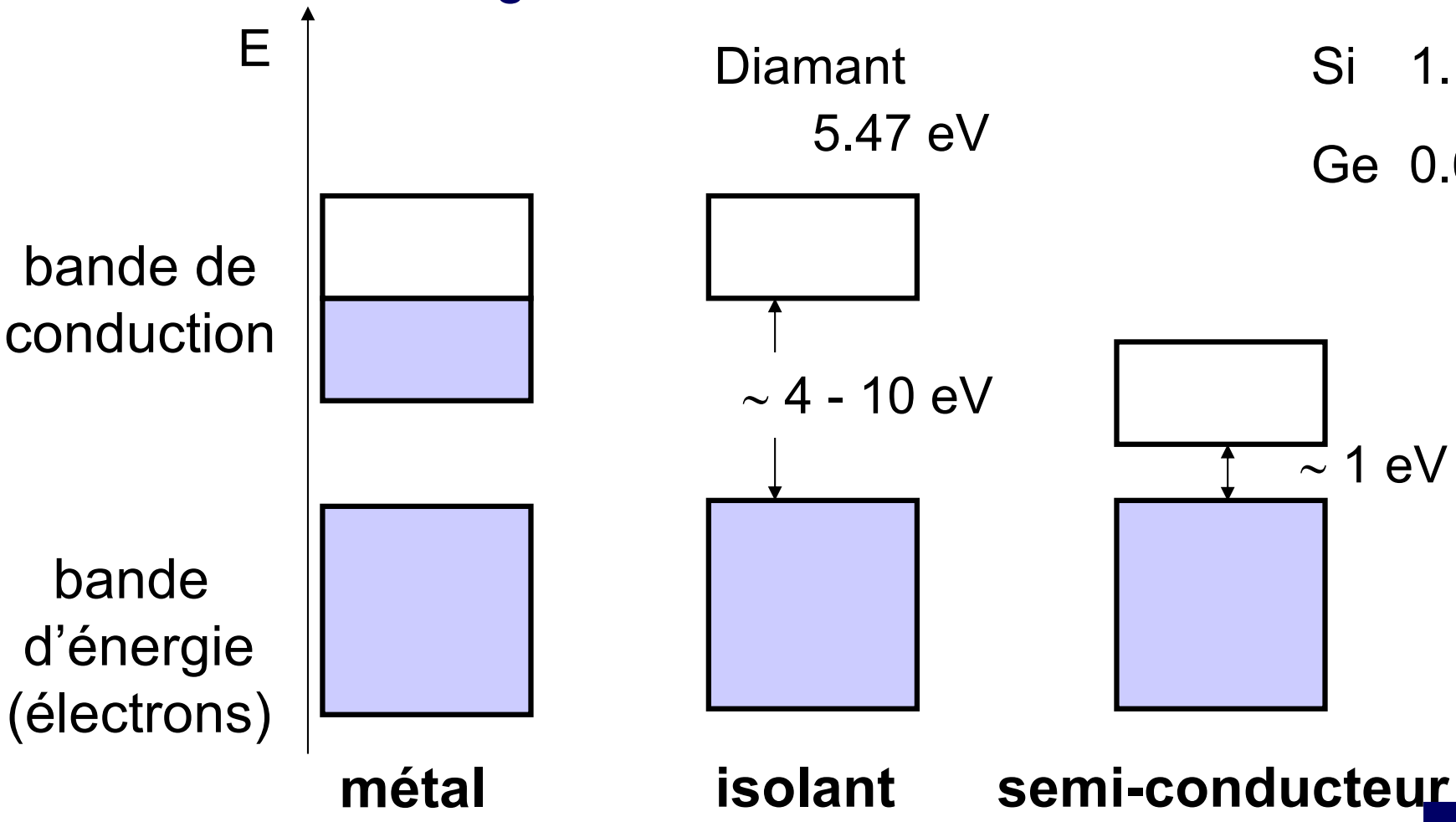
# Conductivité électrique des métaux

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



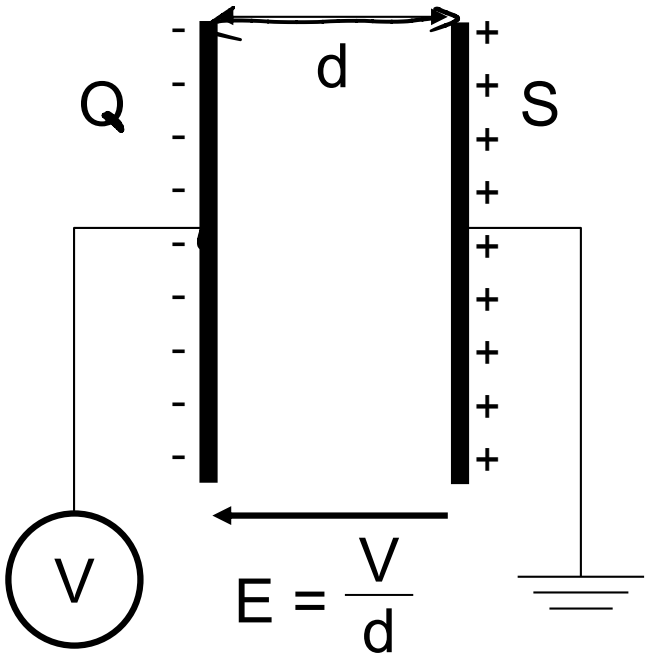
# Matériaux isolants (diélectriques)

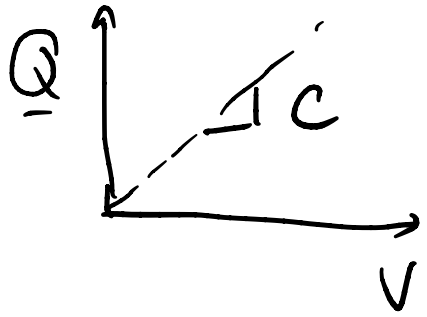
Les **isolants** (cf. cours N° 2) n'ont pas ou très peu d'électrons libres à température ambiante et ne conduisent donc pas l'électricité par mouvement de charges.



# Dipôles électriques

Comment mesure-t-on la densité de dipôles électriques dans le vide:




$Q = C V$

C ← capacité

$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ S → surface plaques, d ← distance entre les plaques

$\varepsilon_0$ : $8.85 \cdot 10^{-12}$ As (Vm)$^{-1}$

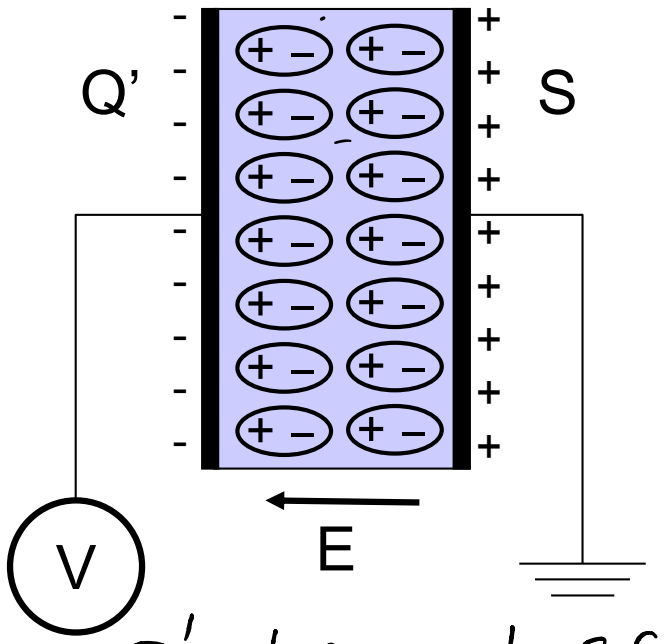
↳ permittivité du vide

Une capacité vide soumise à une différence de potentiel V, accumule une charge Q sur ses plaques qui augmente linéairement avec V

$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ As (Vm)$^{-1}$

# Dipôles électriques

Comment mesure-t-on la densité de dipôles électriques dans la matière, ou plus précisément la **constante diélectrique $\varepsilon_r$**?




$$Q' = C'V \Rightarrow C' = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

Un diélectrique entre les plaques se polarise (ou oriente ses dipôles déjà existants). Cela augmente la charge Q' pour le même potentiel V:

$D$ champ d'induction électrique

Correspond à l'induction $\varepsilon_0 E$

et à la polarisation (eventuelle) du matériau $P$

$$P = \varepsilon_0 \chi_E E$$

$\chi_E$ → susceptibilité électrique

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0 \chi_E E$$

$$= \varepsilon_0 (1 + \chi_E) E$$

$\varepsilon_r = 1 + \chi_E$ Constante diélectrique

$\varepsilon_r$ par définition $> 1$

# 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

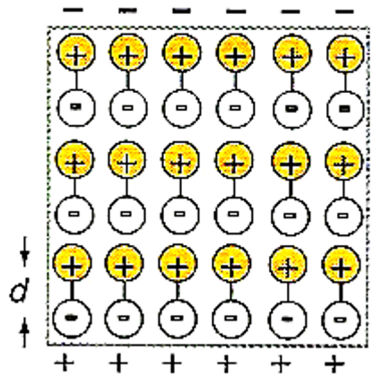
Air humide: 10'000 V/cm

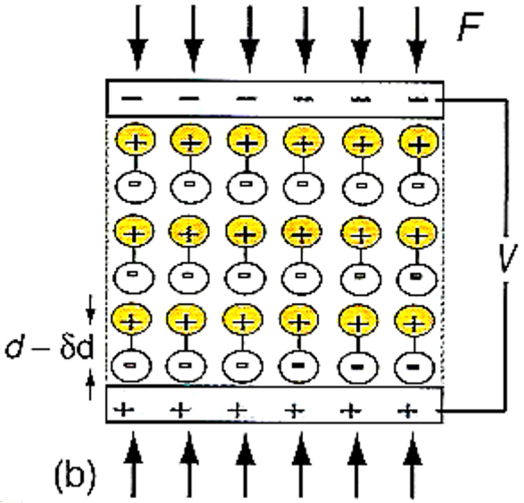
Isolant

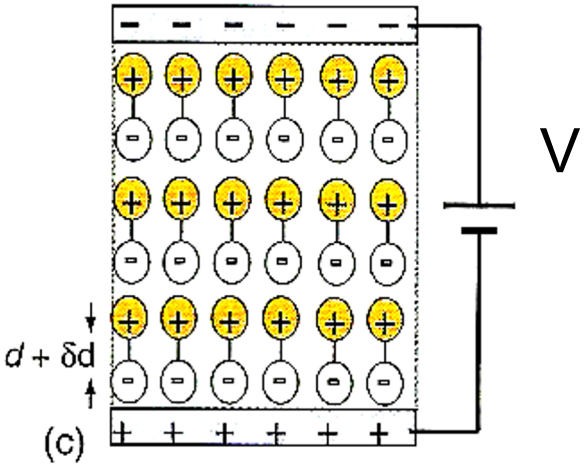
| Matériau | $E_{disr}$ [MV/m] |
|---|---|
| Quartz | 8 |
| $SrTiO_3$ | 8 |
| Néoprène | 12 |
| Nylon | 14 |
| Pyrex | 14 |
| Huile silic. | 15 |
| Papier | 16 |
| Polystyrène | 24 |
| Téflon | 60 |

# Propriétés diélectriques

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).

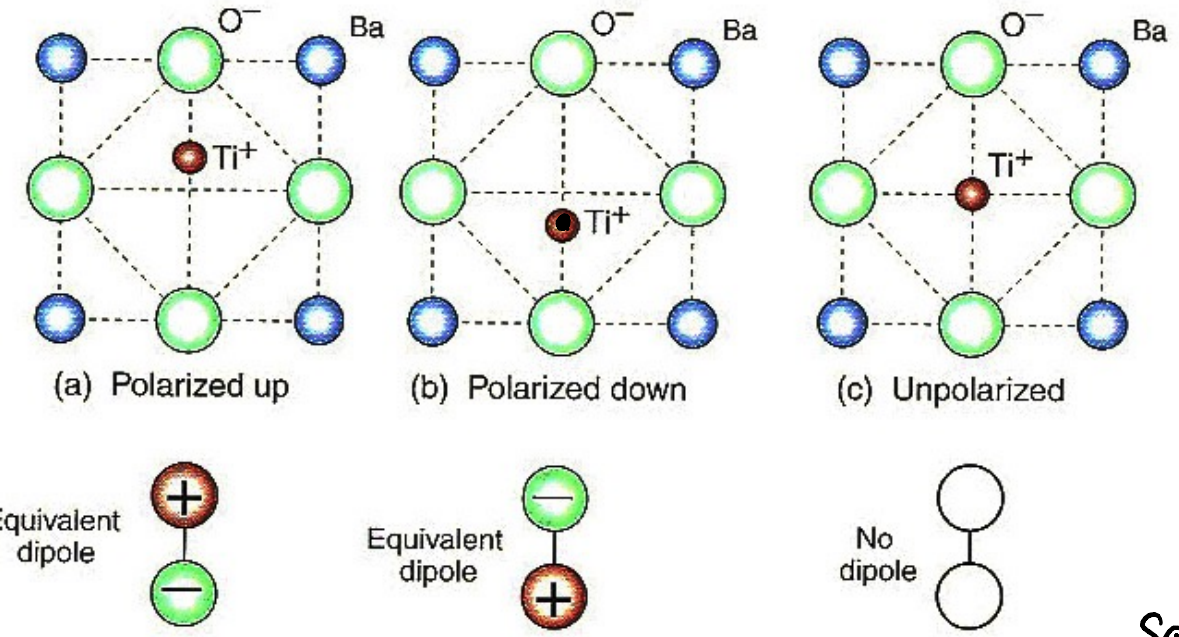


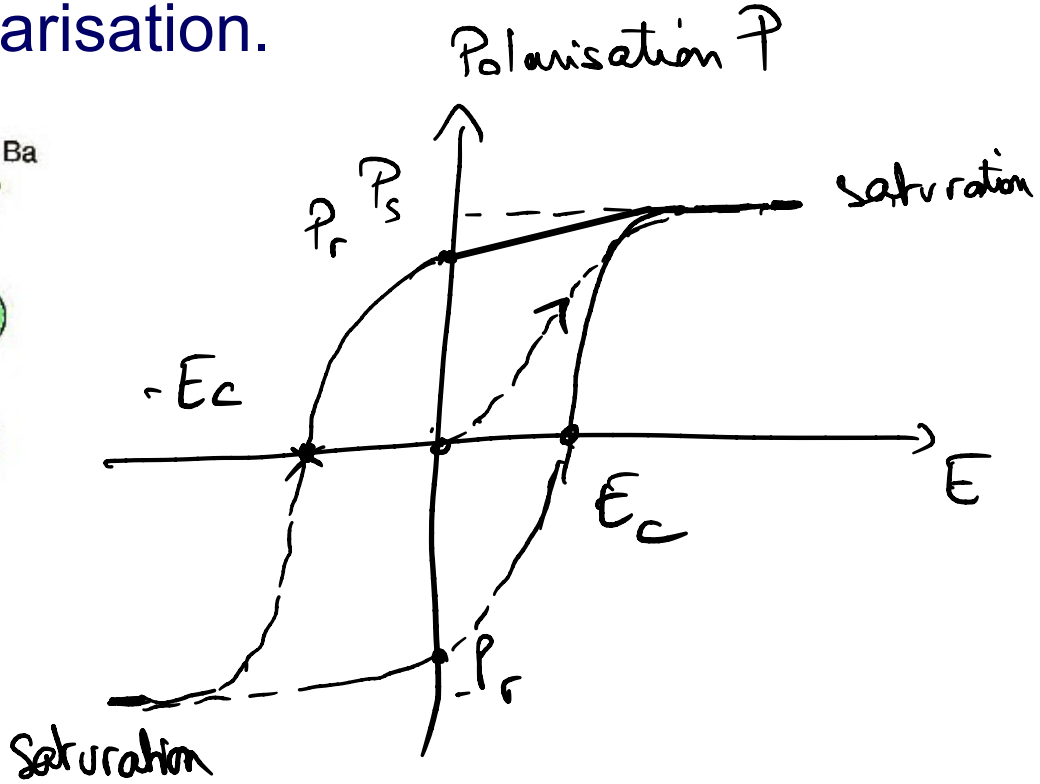



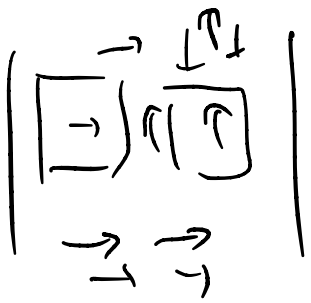



# Propriétés diélectriques

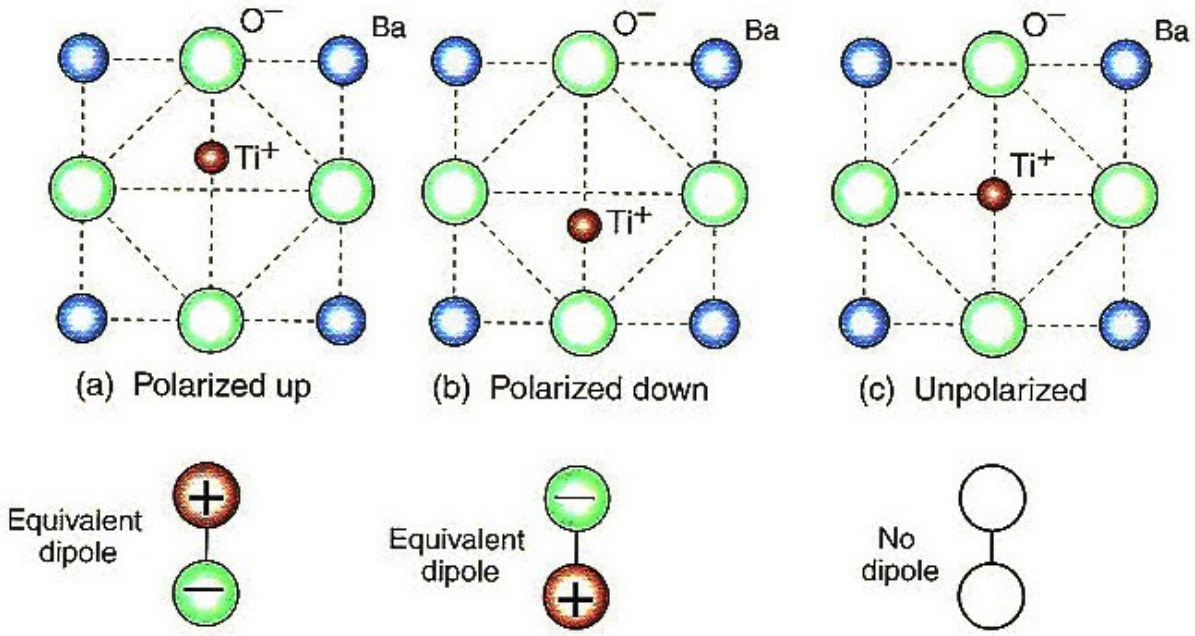
Les **ferroélectriques** tels que $BaTiO_3$, ont un dipôle réversible que l'on peut orienter dans un champ E: en dessous d'une température de Curie, ils peuvent garder leur polarisation.



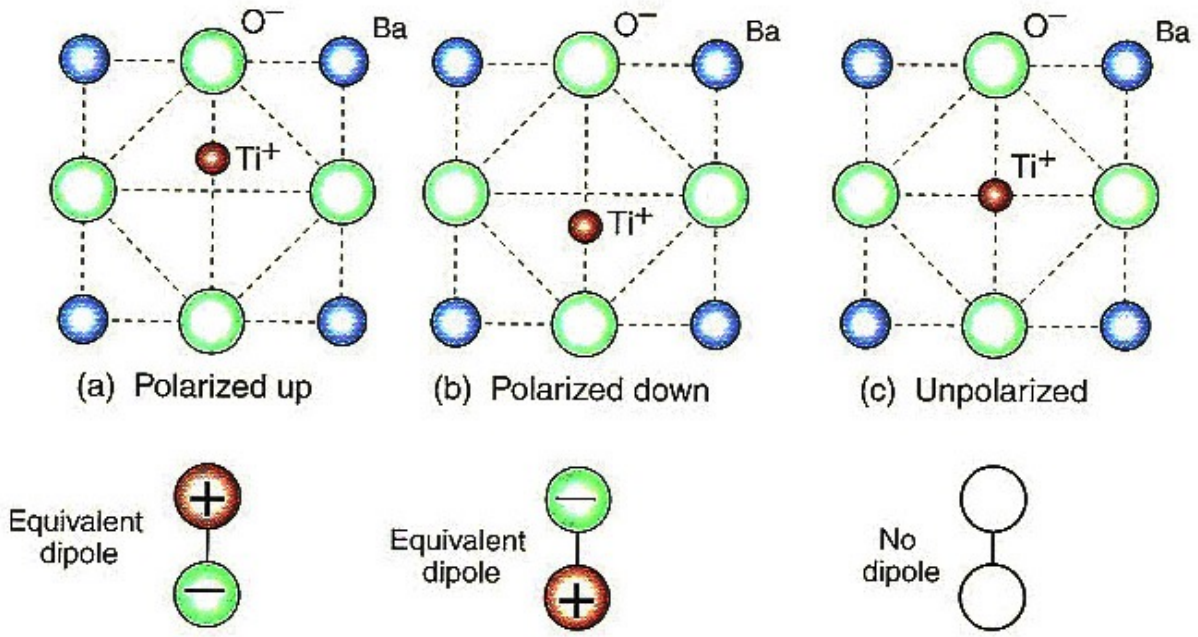



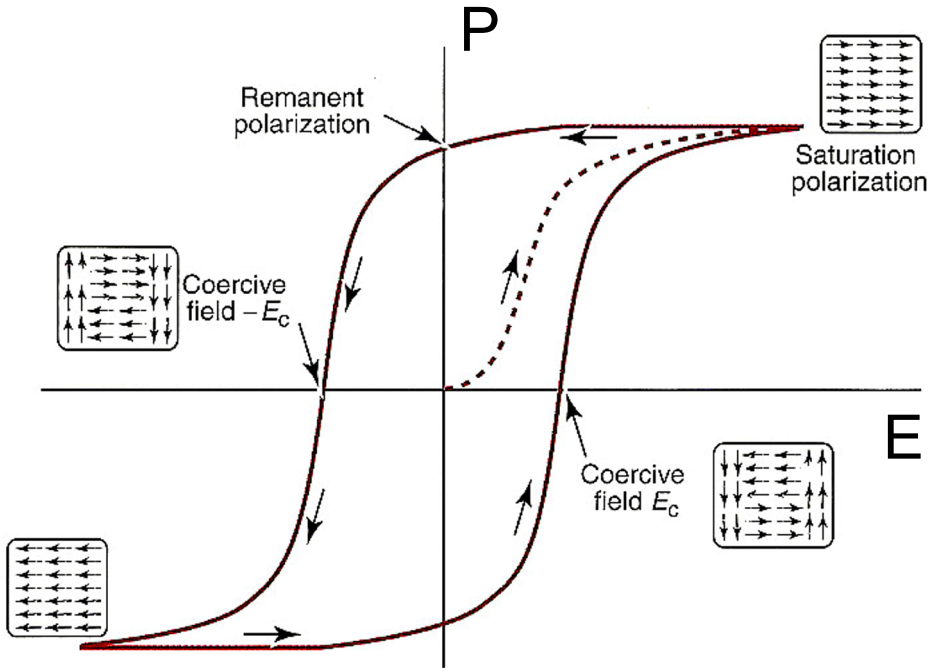
# Propriétés diélectriques



# 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.



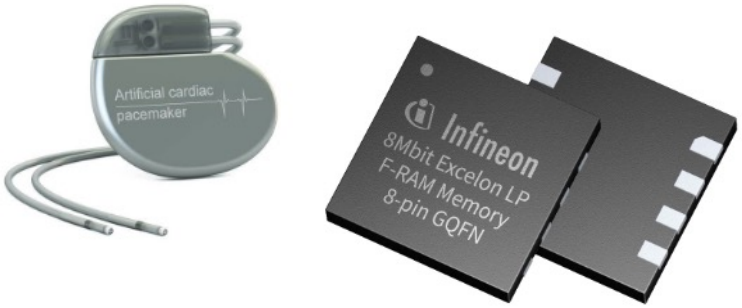




Ce type de matériau présente un cycle de polarisation orientant ces domaines avec une **polarisation à saturation**, une **polarisation rémanente**, un **champ coercitif**.

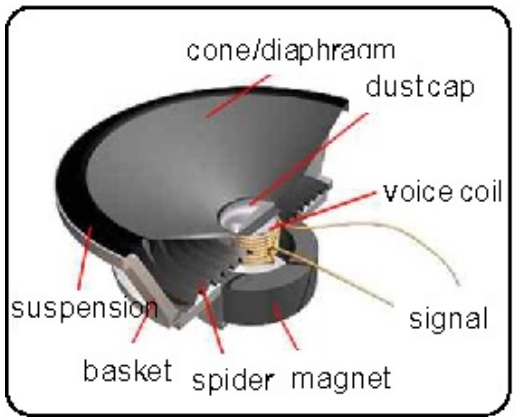
# Propriétés diélectriques

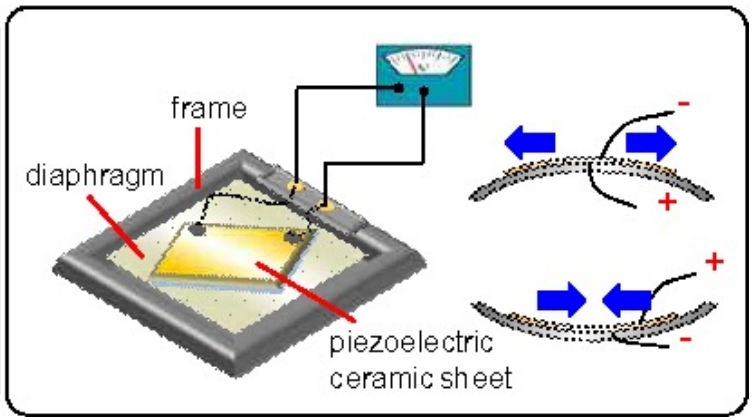
Les **ferroélectriques** sont utilisés dans de nombreuses applications: actuateurs, capteurs, stockage permanent de données, etc.

https://www.infineon.com/cms/en/product/memories/f-ram-ferroelectric-ram/excelon-f-ram/

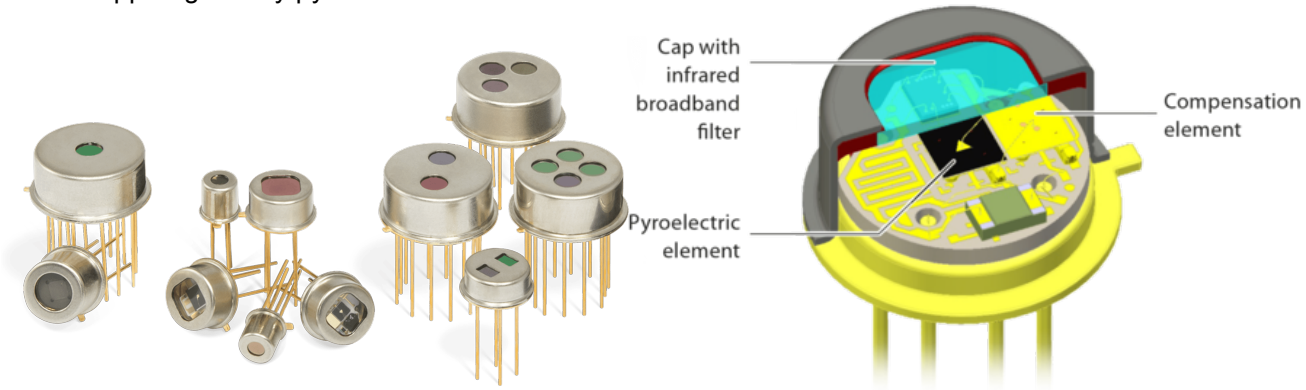



https://www.semanticscholar.org/paper/Low-frequency-reinforced-ferroelectric-acoustic-Kim-Yang/




https://www.infratec.eu/sensor-division/service-support/glossary/pyroelectric-detector/




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

# Propriétés magnétiques

- Le champ magnétique agit sur, et est créé par, des charges en mouvement. Les moments magnétiques sont représentés par des petites boucles de courant qui peuvent créer un champ, ou répondre en s'orientant dans un champ magnétique **H**.
- Dans la matière, de tels moments sont présents du fait du mouvement des électrons autour du noyau, et de leur « rotation intrinsèque », ou spin.
- Les propriétés magnétiques des matériaux dépendent alors de la présence de tels moments magnétiques:
  - Les moments atomiques dus aux orbitales des électrons et de leur spin;
  - Les moments magnétiques de spin des électrons libres de la bande de conduction

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

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

# Propriétés magnétiques

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

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

- Un champ magnétique **H** ($A.m^{-1}$) appliqué va alors créer une aimantation **M** ($A.m^{-1}$), et donc un champ magnétique induit dans le matériau **B** ($Vs/m^2$ ou Tesla) :

$H\ [A\,m^{-1}]$ $\quad M = \chi_M H$ ($\chi_M$ : susceptibilité magnétique)

$B = \mu_0 H$ si je suis dans le vide ($\mu_0$ : constante magnétique du vide)

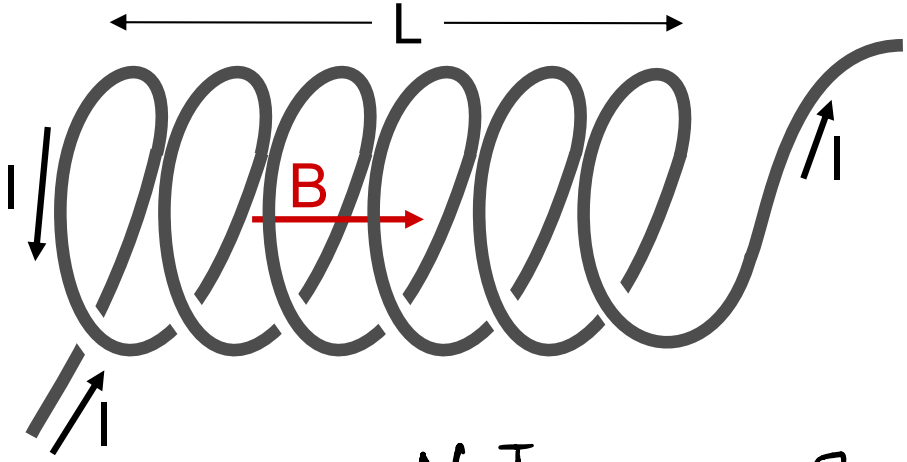
dans 1 matériau $B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 \mu_r H$

- $\mu_r$ et $\chi_M$ sont la perméabilitié relative et la susceptibilité magnétique respectivement, grandeurs sans dimension, et $\mu_0$ est la constante magnétique du vide.

($\mu_r$ : perméabilité magnétique relative du matériau)

# Dipôles magnétiques

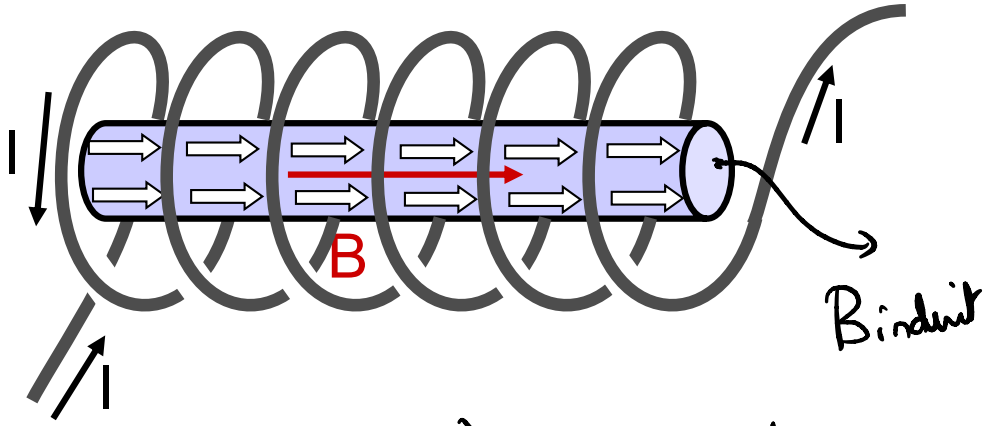
On peut mesurer la densité de dipôles magnétiques dans la matière, ou la **perméabilité magnétique $\mu_r$** (sans unités):




$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{N I}{L} \quad [Vsm^{-2}]$$

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

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




$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 \mu_r H$$

$$\mu_r = (1 + \chi_M)$$

Un corps magnétique placé dans la bobine renforce l'induction magnétique par l'ensemble des moments magnétiques. $\chi_M$ est la **susceptibilité magnétique** (sans unités).

# Magnétisme

On distingue trois types de magnétismes :

- Diamagnétisme: Le champ **H** perturbe les orbitales des électrons qui changent en créant un moment **M** s'opposant à **H**: La susceptibilité $\chi_M$ est négative et faible ($\approx -10^{-5}$)

  Exemples: plupart des isolants, Cu, Zn, Si, Ag, Au

- Paramagnétisme: Le champ magnétique agit sur des moments déjà existants. Il les aligne le long de sa direction: $E = -\vec{M}.\vec{B}$

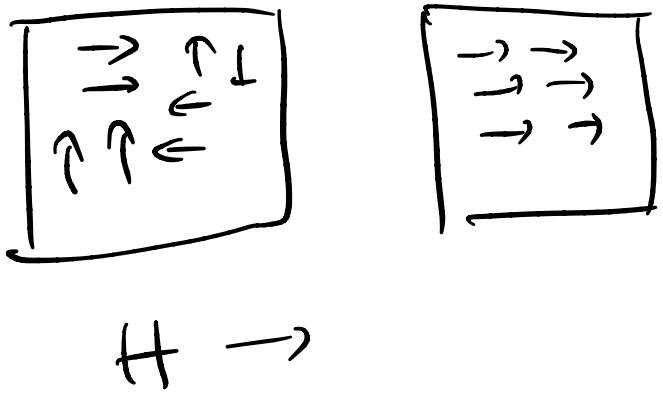
  Exemples: Al, Cr, Mo, Ti, Na. La susceptibilité est positive mais faible.

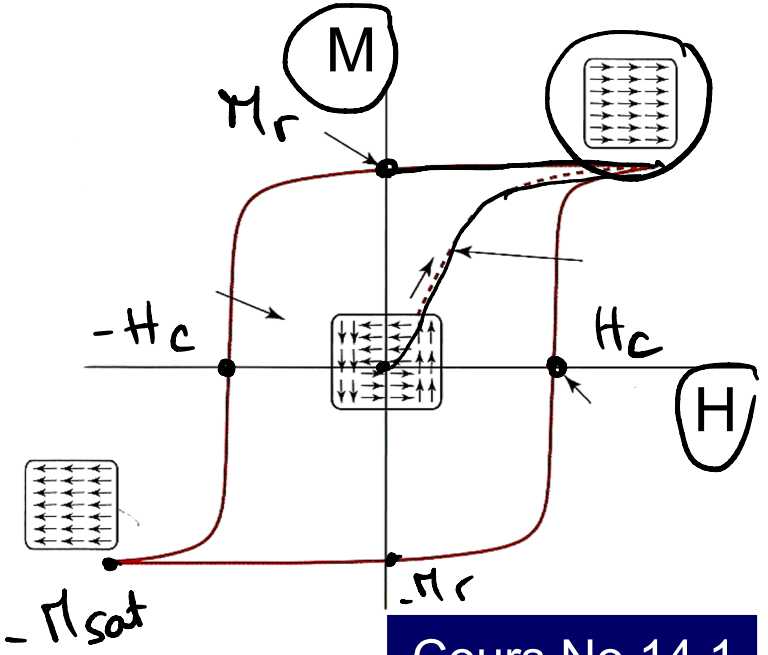
# Magnétisme

- Ferromagnétisme: En dessous d'une certaine température dite de Curie ($T_c$), les paramagnétiques peuvent avoir une aimantation, et donc un champ magnétique, permanent.

Ceci est dû à l'interaction entre les moments magnétiques.

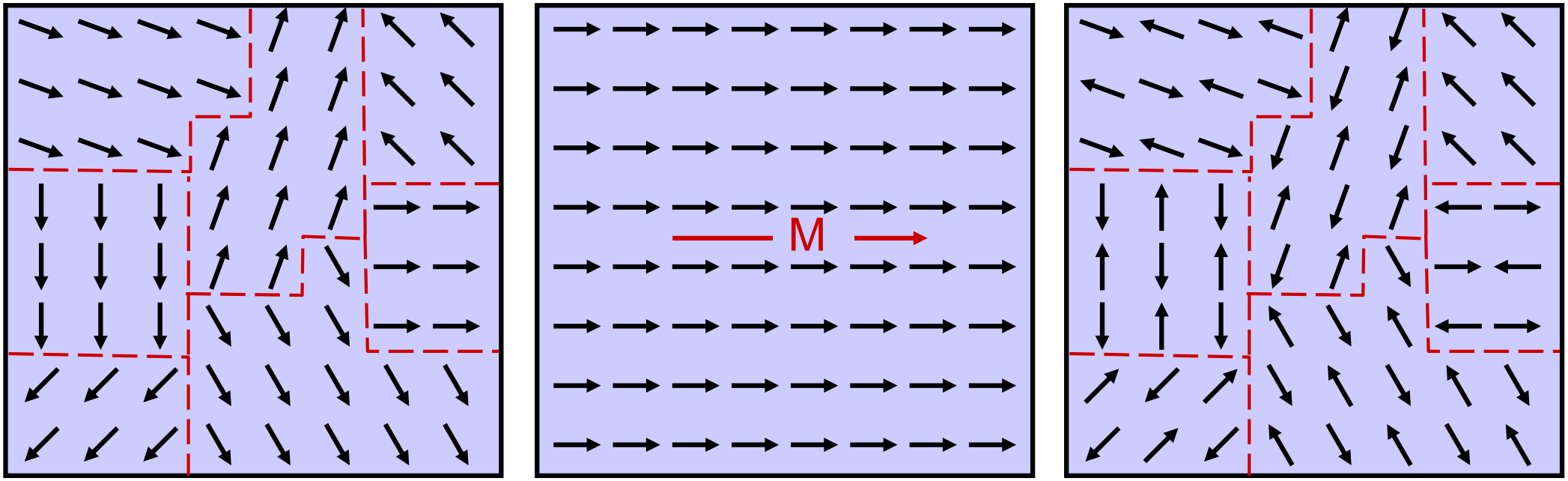
Exemples: Fe, Ni, Co, alliages Fe-B-Nd qui ont des $T_c$ de plusieurs centaines de K et une grande susceptibilité magnétique.



# Propriétés magnétiques

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




Ferromagnétique
H = 0 ; M = 0

Ferromagnétique
H ; $M = \chi_M H$

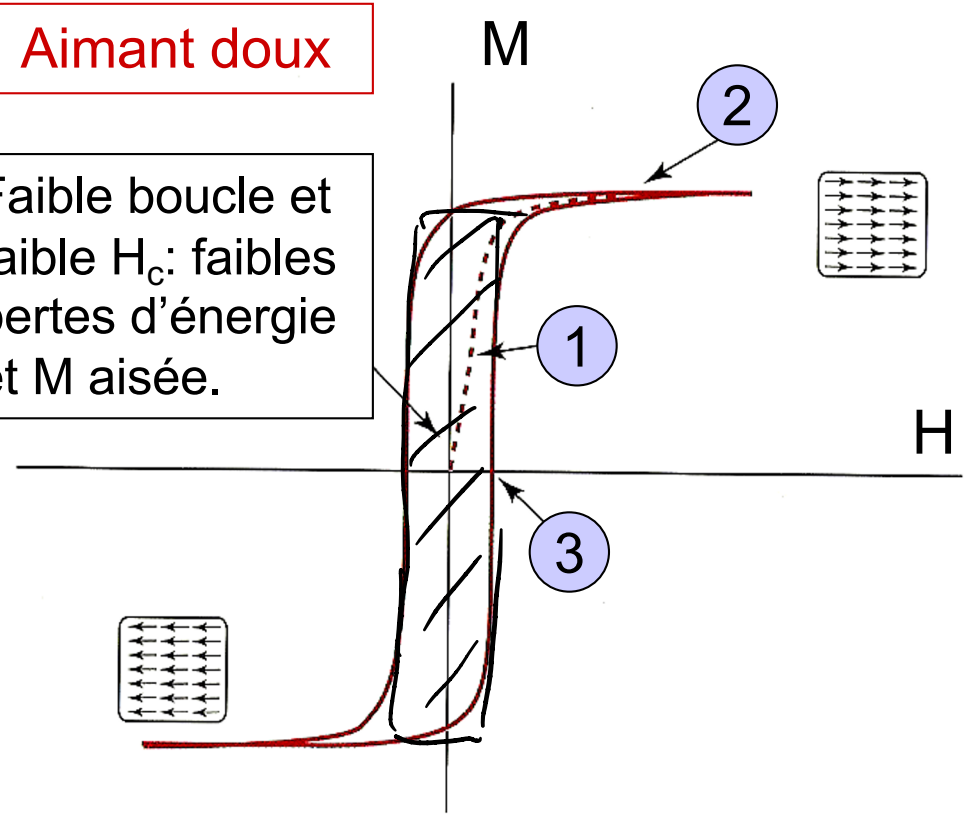
Anti-ferromagnétique
H = 0 ; M = 0

# Propriétés magnétiques

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

Aimant doux

Faible boucle et faible $H_c$: faibles pertes d'énergie et M aisée.




électro-aimants

$$W_{mag} = \int B\,dH$$

1 : Susceptibilité magnét. initiale

2 : Aimantation à saturation $M_{sat}$

3 : Champ coercitif, $H_C$

4 : Aimantation résiduelle ou rémanente, $M_R$

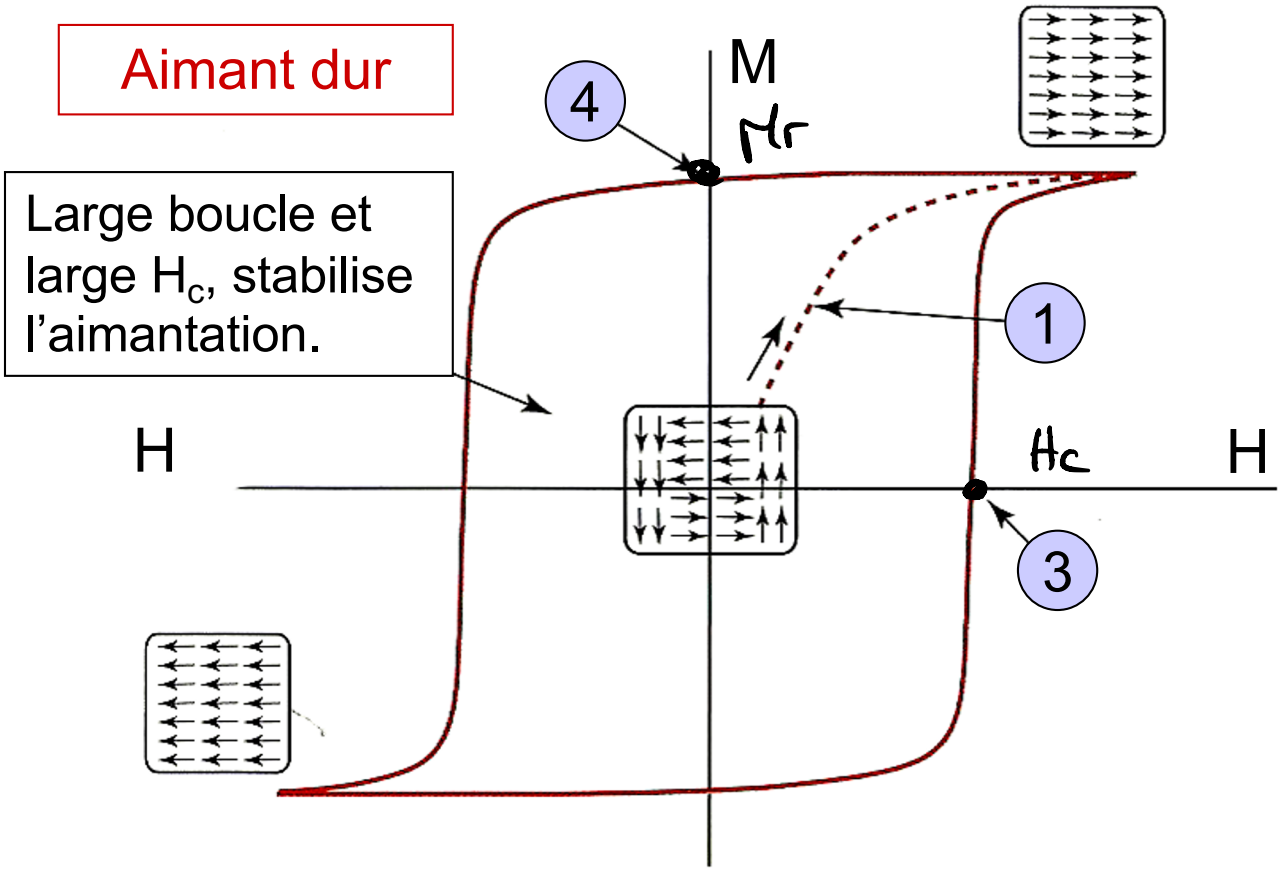
# Propriétés magnétiques

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

Aimants permanents

Aimant dur

Large boucle et large $H_c$, stabilise l'aimantation.




1 : Susceptibilité magnét. initiale

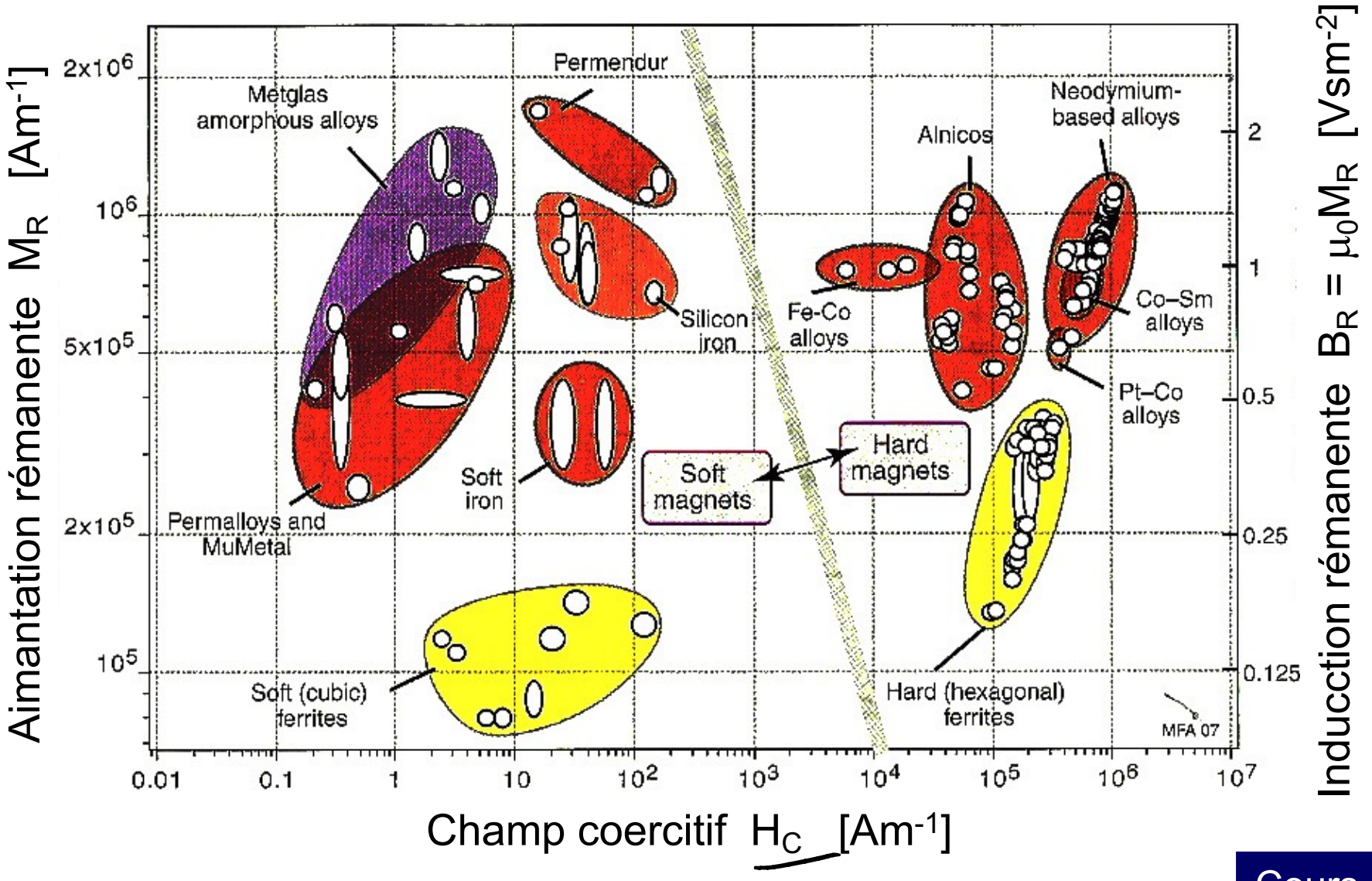
2 : Aimantation à saturation $M_{sat}$

3 : Champ coercitif, $H_C$

4 : Aimantation résiduelle ou rémanente, $M_R$

# Propriétés magnétiques

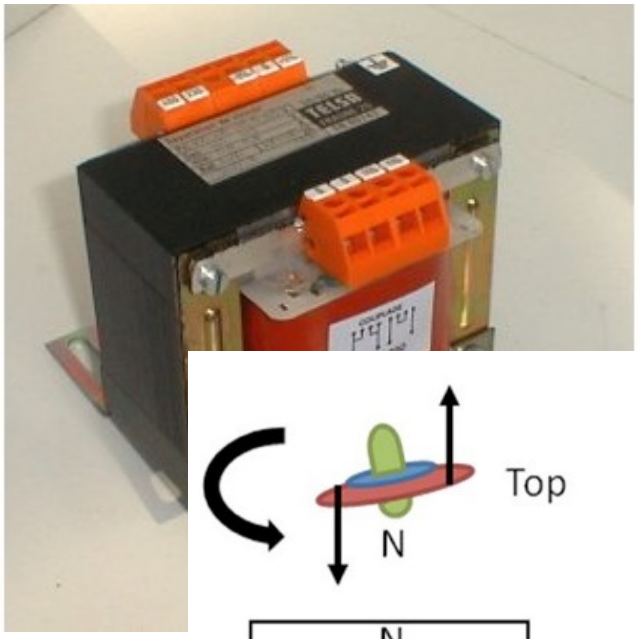
## Propriétés magnétiques de quelques ferromagnétiques.

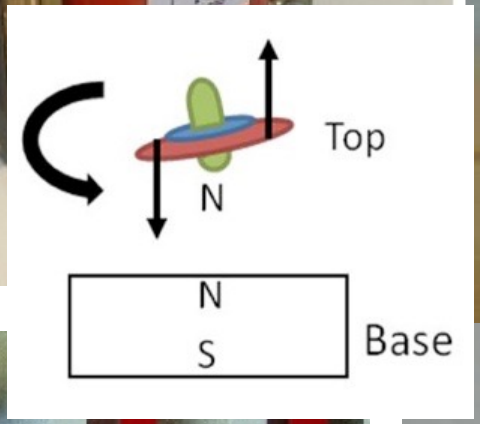


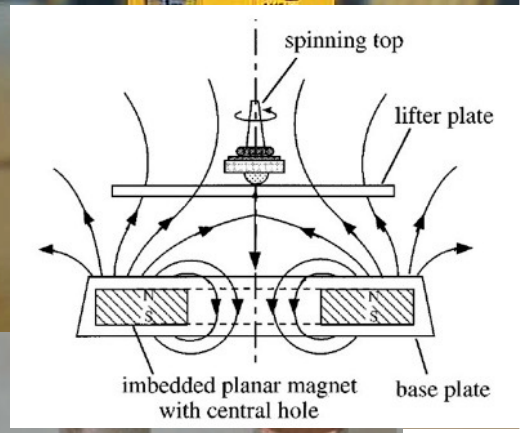
# Propriétés magnétiques

Les applications des ferromagnétiques sont nombreuses:

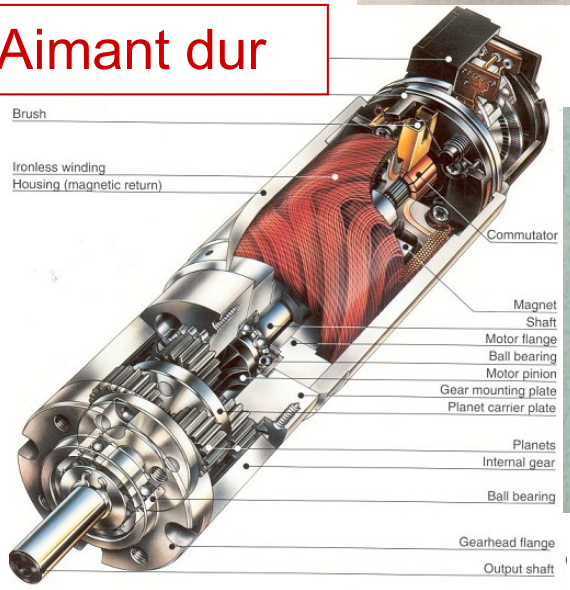
Aimant doux

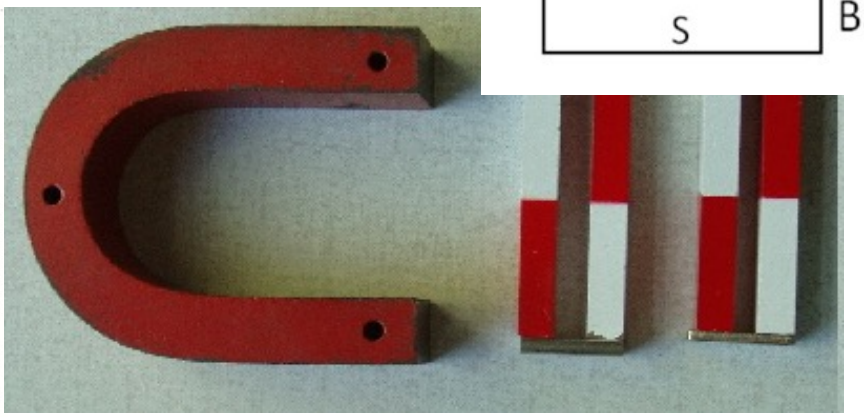


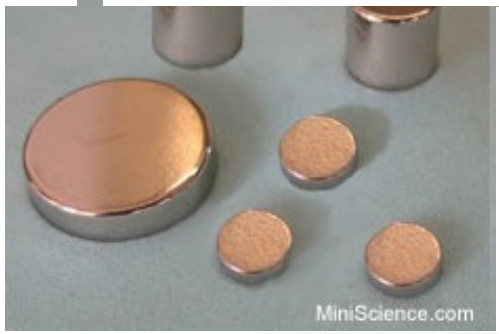



Aimant dur





# Résumé

- De nombreuses applications requièrent des matériaux certaines fonctions électriques, magnétiques ou optiques.
- Les métaux sont des conducteurs, les polymères et les céramiques sont généralement des isolants. On les caractérise par la conductivité et le potentiel disruptif, respectivement.
- Les diélectriques (ou isolants) sont caractérisés par une constante diélectrique relative, $\varepsilon_r$, les matériaux magnétiques par une permittivité magnétique relative, $\mu_r$.
- De la même manière que l'on peut distinguer des matériaux dia-, para- et ferro-magnétiques, on a également des matériaux dia-, para- et ferroélectriques. Des phénomènes croisés tels que piezo-électricité ou thermo-électricité peuvent avoir lieu.

# A retenir du cours d'aujourd'hui

- *Connaître les définitions de dipôle électrique/magnétique, constante diélectrique, perméabilité magnétique, diamagnétique, paramagnétique, ferromagnétique, Température de Curie, diélectrique, piézo-électrique.*
- *Savoir lire une courbe d'hystérèse pour la magnétisation ou la polarisation, et savoir repérer dessus le champ coercitif et la valeur de saturation, et évaluer l'énergie dissipée lors d'un cycle.*
- *Savoir la différence entre un aimant doux et un aimant dur.*