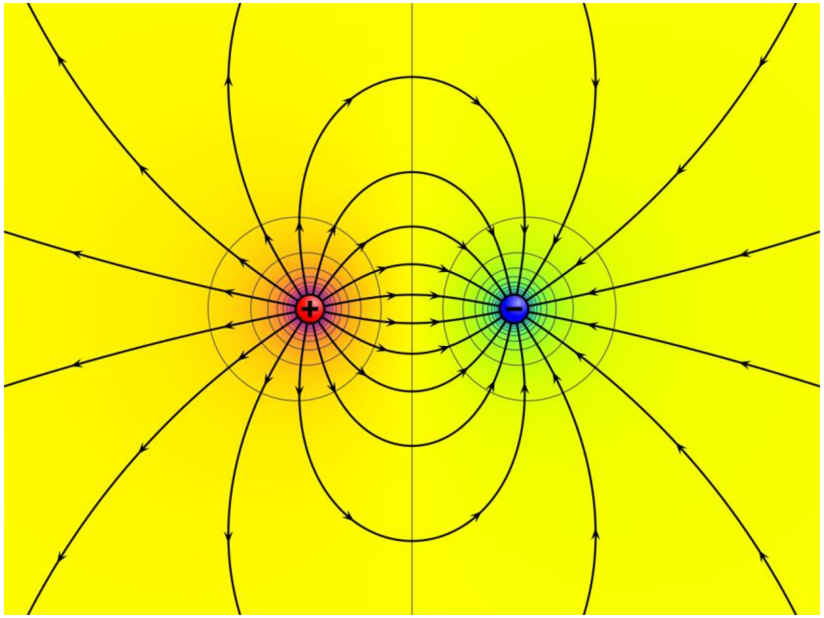
Éléments de Physique : Électromagnétisme

CHAPITRE 2 : ÉNERGIE ET POTENTIEL ÉLECTRIQUES, CONDENSATEURS

Jérémy Brisbois – 2023-2024

Table des matières

1. Énergie et potentiel électrique
2. Condensateurs et capacité
3. Conducteurs, isolants, diélectriques



Rappels

Force entre deux charges q et Q distantes de r :

$$\boxed{\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}} = q\boldsymbol{E}}$$

Champ électrique (en $\boldsymbol{r}$) créé par une charge ponctuelle Q :

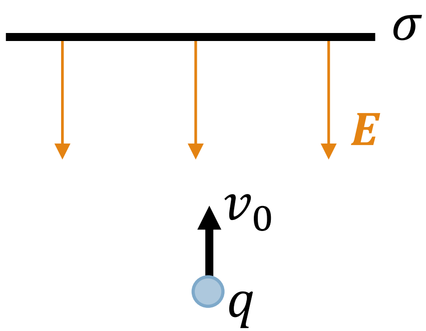
$$\boxed{\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}}}$$

Champ électrique créé par un plan (infini) avec une charge surfacique σ :

$$\boxed{\boldsymbol{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\hat{\boldsymbol{n}}}$$

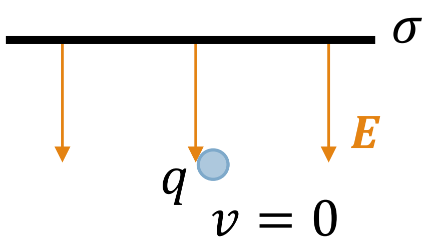
Du champ au potentiel électrique

Plan chargé et charge q de même signe.



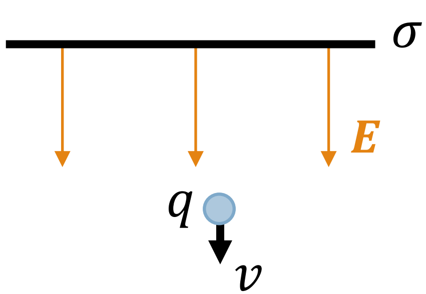
Initialement, la charge q a

- une vitesse v_0
- une énergie cinétique $K_0 = \frac{1}{2}mv_0^2$.



En approchant du plan, la charge ralentit (répulsion coulombienne) et finit par s'arrêter : elle acquiert de l'**énergie potentielle électrique**.

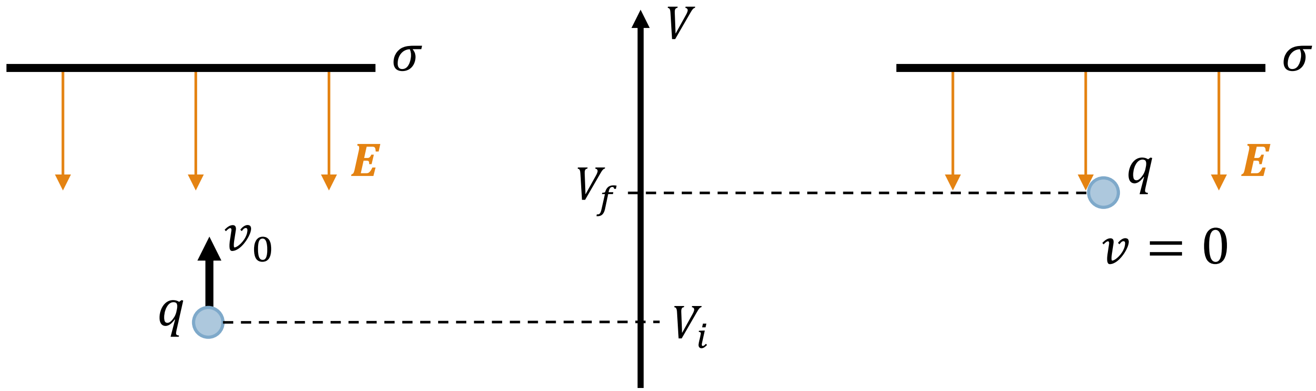
- énergie cinétique $K = 0$
- énergie potentielle $\Delta U = K_0 = \frac{1}{2}mv_0^2$



Ensuite, la charge repart en sens inverse.

Situation analogue : masse dans un champ de gravité

Différence de potentiel



La charge q gagne une énergie potentielle ΔU.

Entre ces deux points, on définit une différence de potentiel ΔV telle que

$$\boxed{\Delta U = q\Delta V = q(V_f - V_i)}$$

Analogie avec l'énergie potentielle gravitationnelle : $\Delta U = mg\Delta h$

$$U = qV + \text{cste} \qquad\qquad U = mgh + \text{cste}$$

Potentiel électrique

On peut définir le **potentiel électrique** $V(\boldsymbol{r})$ en tout point de l'espace.

Il correspond à l'énergie U gagnée par une charge unitaire placée en $\boldsymbol{r}$:

$$\boxed{V(\boldsymbol{r}) = \frac{U(\boldsymbol{r})}{q}}$$

Unité : [J/C] = volt [V]

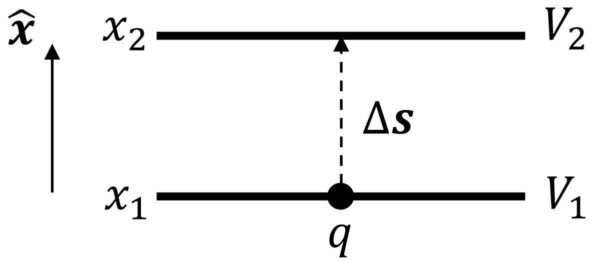
Énergie gagnée par rapport à où ? $U = qV + \mathrm{cste}$

⟶ Il est nécessaire de définir une **référence de potentiel** :

- soit $V = 0$ à l'infini (loin de toute charge) : $U = qV$, car $\mathrm{cste} = 0$
- soit on considère ΔV entre 2 points : $\Delta U = q\Delta V$, cste disparaît

Travail et potentiel électrique

Lien entre le travail de la force électrique et le potentiel électrique (1D)



Travail de la force électrique entre 2 points :

$$W = \boldsymbol{F}.\Delta\boldsymbol{s} = q\boldsymbol{E}.\Delta\boldsymbol{s} = \begin{cases} qE(x_2 - x_1) \\ -qE(x_2 - x_1) \end{cases}$$

+ si $\boldsymbol{E}$ est dans le sens de $\Delta\boldsymbol{s}$

- si $\boldsymbol{E}$ est dans le sens opposé à $\Delta\boldsymbol{s}$

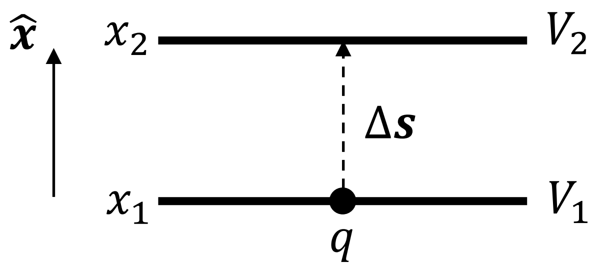
$\boldsymbol{E}$

$\boldsymbol{E}$

$$W = -\Delta U = -q\Delta V = -q(V_2 - V_1)$$

Champ et potentiel électrique

Lien entre champ électrique et potentiel électrique (1D)



$$(V_2 - V_1) = \begin{cases} -E(x_2 - x_1) \\ E(x_2 - x_1) \end{cases}$$

- si $\boldsymbol{E}$ est dans le sens de $\Delta \boldsymbol{s}$ $(V_2 < V_1)$
+ sinon $(V_2 > V_1)$

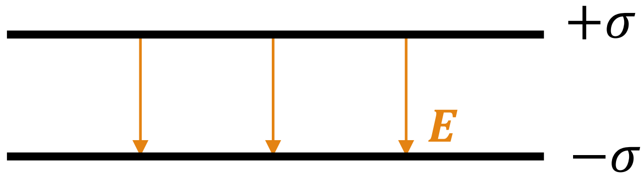
En 1D : $\boldsymbol{E} = -\frac{V_2 - V_1}{x_2 - x_1}\hat{\boldsymbol{x}} = -\frac{dV}{dx}\hat{\boldsymbol{x}}$

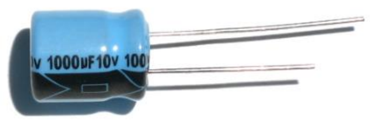
En 3D : $\boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\nabla} V = -\left(\frac{dV}{dx}, \frac{dV}{dy}, \frac{dV}{dz}\right)$

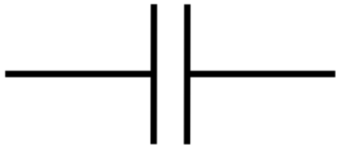
Potentiel d'une charge ponctuelle q : $\boxed{V(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}}$

Condensateur

Un **condensateur** est un dispositif, constitué de deux armatures conductrices, capable de **stocker des charges électriques**.







Cas simple : condensateur plan, formé de 2 plans parallèles, mais d’autres géométries existent (cylindrique…)

- Pour charger le condensateur, on applique une différence de potentiel ΔV entre les 2 armatures (initialement neutres).
- Le comportement d’un condensateur est dynamique et dépend de son état à un instant donné. Ainsi, plus sa charge instantanée est grande, plus il difficile de l’augmenter.

Cas simple : charge exponentielle (voir exos/TP).

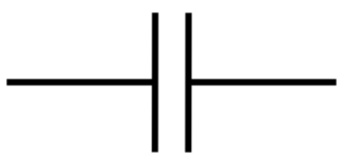
Capacité

La **capacité** est la grandeur physique qui relie la charge portée par un condensateur (à l'équilibre) et la différence de potentiel appliquée.

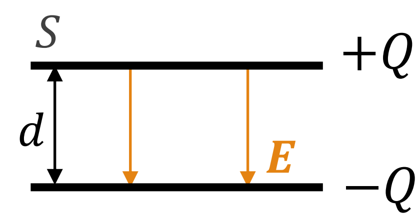
$$\boxed{C = \frac{Q}{\Delta V}}$$

$Q = C\Delta V$
charge d'une (!) armature

Unité : [C/V] = farad [F]

Symbole : 

Pour un **condensateur plan** : $\boxed{C = \varepsilon \frac{S}{d}}$



S est l'aire d'une des 2 armatures, d la distance qui les sépare.

ε est la **permittivité diélectrique** du milieu entre les plaques.

Conducteurs vs isolants

Les matériaux ne réagissent pas tous de la même façon lorsqu'ils sont placés dans un champ $\boldsymbol{E}$. On distingue principalement deux types de comportements :

Conducteurs

- Métaux, eau
- Laissent circuler les électrons
- Haute conductivité électrique + réfléchissants

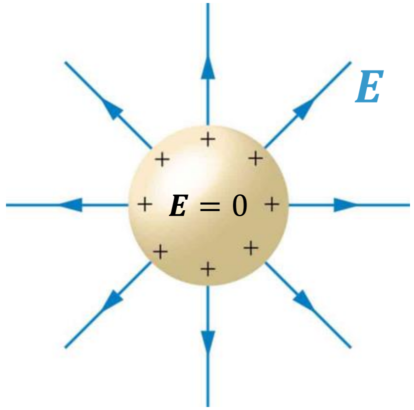
Isolants

- Verre, céramique, plastique, air, eau distillée…
- Ne laissent pas circuler les électrons
- Conductivité électrique faible ou nulle + transparents ou opaques

Effet de V et $\boldsymbol{E}$ sur la matière

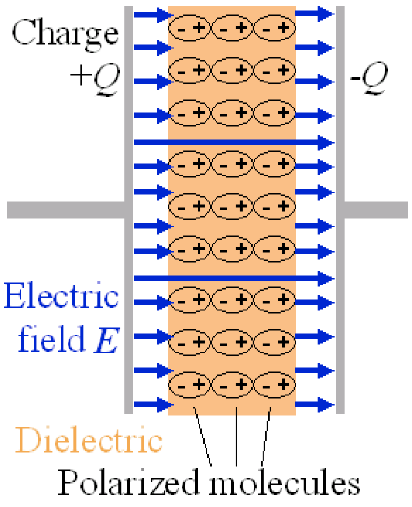
Conducteurs (à l'équilibre)

- Tout est au même V.
- $\boldsymbol{E}$ est nul à l'intérieur.
- $\boldsymbol{E}$ en surface est orthogonal à celle-ci.
- La charge excédentaire est sur la surface.



Isolants

- $\boldsymbol{E}$ donne lieu à (« induit ») une polarisation.
- $\boldsymbol{E}$ n'est pas nul à l'intérieur.
- $\boldsymbol{E}$ en surface n'est pas forcément normal à celle-ci.
- La charge est localisée.



Cage de Faraday

- Cage construite avec des matériaux conducteurs
- Protection contre les champs électriques
- La charge excédentaire se répartit sur la surface du conducteur et le champ électrique à l'intérieur reste nul.

Condensateur amélioré

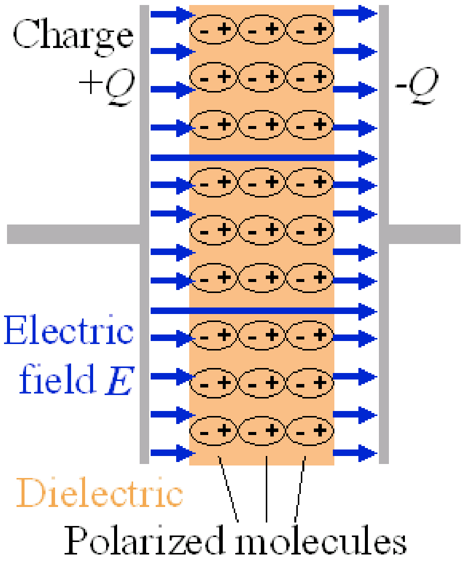
Comment augmenter la quantité de charge portée par un condensateur pour ΔV donné ?

$$Q = C\Delta V$$

On utilise un isolant polaire (**diélectrique**)

- ne conduit pas les charges,
- est capable de se polariser sous l'effet de $\boldsymbol{E}$,
- augmente la valeur de la permittivité diélectrique ε,

  et donc de C → on peut stocker plus de charges.



$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \text{ (condensateur plan)}$$

Permittivité diélectrique

- La **permittivité diélectrique** ε quantifie la réaction d'un matériau soumis à un champ $\boldsymbol{E}$. Plus elle est grande, plus le matériau se polarise sous l'effet de $\boldsymbol{E}$.

Unités : [F/m] = [$C^2.s^2.kg^{-1}.m^{-3}$]

Permittivité diélectrique du vide : $\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m

- On peut également définir la **constante diélectrique** ε_r (ou **permittivité relative**) :

$$\boxed{\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0}$$

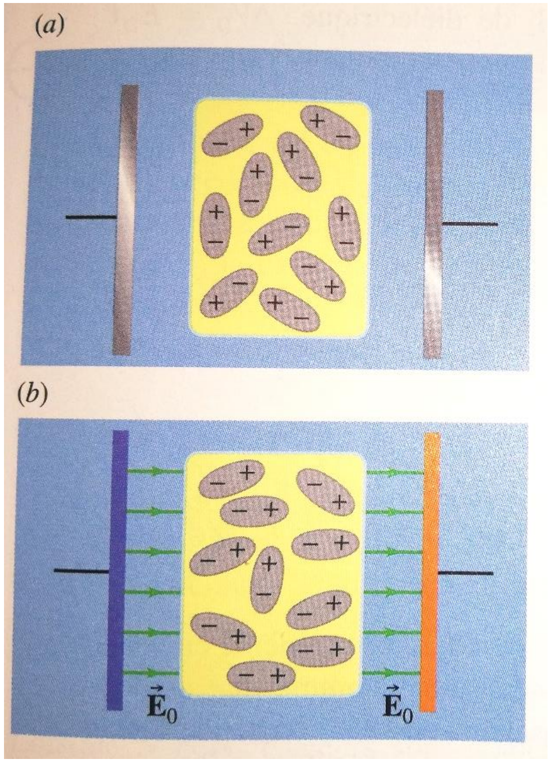
Unités : grandeur sans dimension

Ces grandeurs donnent une indication sur la **polarisation induite**.

Constante diélectrique

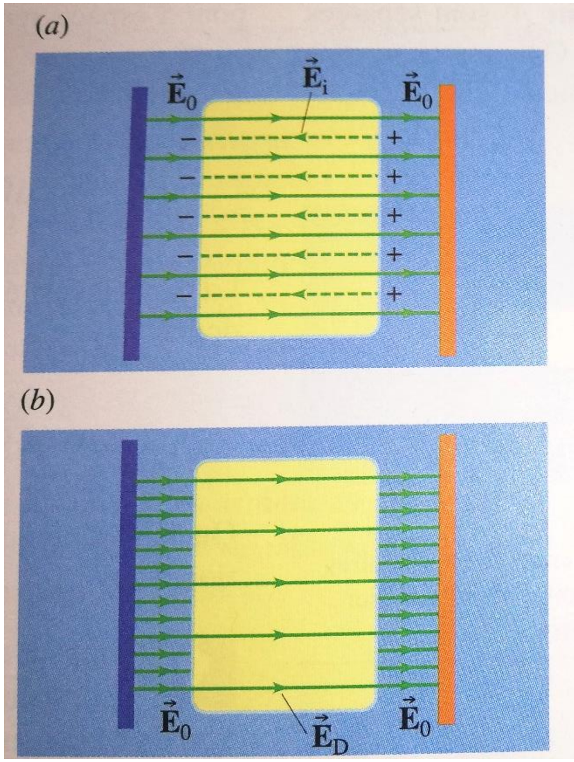
La constante diélectrique ε_r correspond au rapport entre le champ appliqué E_0 et le champ effectif E_D dans le matériau :

$$\varepsilon_r = \frac{E_0}{E_\mathrm{D}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$



$$E_\mathrm{D} < E_0$$

$$\varepsilon_r \geq 1$$



Constante diélectrique

Valeurs typiques :

- Dans le vide, on a $\varepsilon_r = 1$.
- Pour l'air ε_r est à peine supérieure à 1.
- Pour le verre $\varepsilon_r \sim 10$.
- Dans les matériaux polaires et diélectriques, ε_r peut aller jusqu'à 1000.
- Pour les métaux, ε_r est pratiquement $+\infty$. La polarisabilité y est limitée seulement par la résistance au courant (cf. chapitre 3).

Dispositifs électroniques

Le condensateur est un exemple parmi les nombreux dispositifs utilisés en électronique.

La difficulté (et le génie) de l'électronique réside dans le fait de combiner astucieusement des matériaux isolants et (semi-)conducteurs pour obtenir les propriétés désirées.

- Silicium : Si
- Oxide de silicium : SiO_2
- Métaux : Al, Cu, Au