Chapitre 2 : Energie potentielle électrique. Potentiel électrique

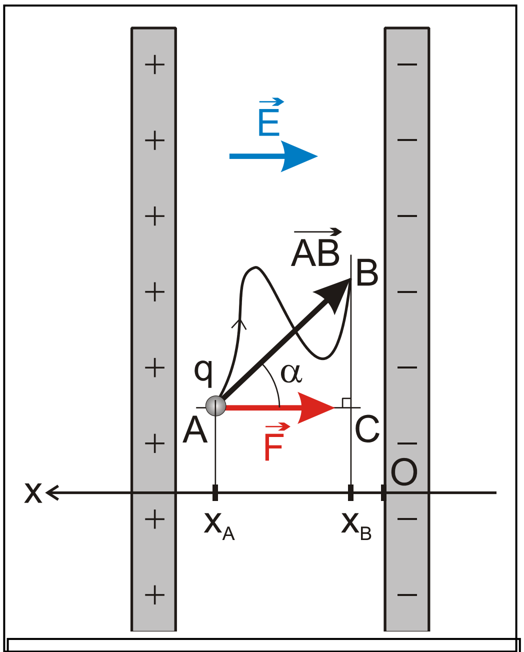
1. Travail de la force électrique

a) Expression mathématique dans le cas du déplacement d'une charge positive

Une particule de charge $q > 0$ est transportée de A vers B dans le champ uniforme d'un condensateur plan. (Pour que ce déplacement se fasse il faut bien sûr qu'il y ait des forces extérieures appropriées qui agissent sur q !).

Considérons le repère d'axe Ox (parallèle au champ électrique $\vec{E}$ et orienté dans le sens opposé à $\vec{E}$) (de même que l'axe 0z est parallère à $\vec{g}$ mais de sens contraire).

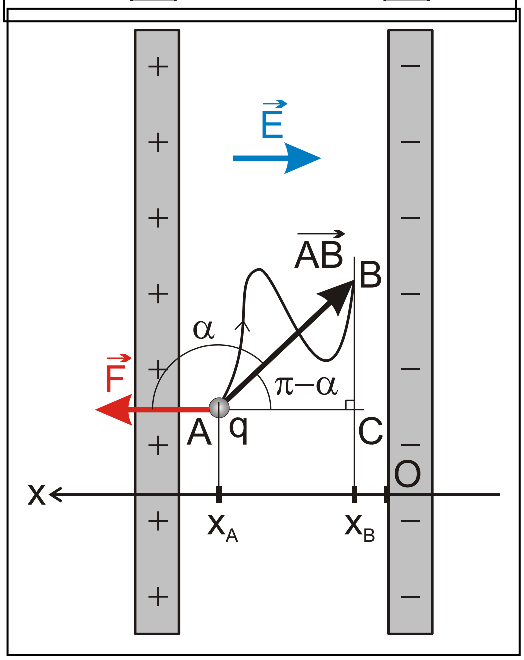
A = point initial = point de départ ;
B = point final = point d'arrivée.



Le champ $\vec{E}$ est uniforme. La force électrique $\vec{F} = q\vec{E}$ est donc constante au cours du déplacement, donc son travail $W(\vec{F})$ est indépendant du chemin suivi :

$$W(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$$
$$W(\vec{F}) = F \cdot AB \cdot \cos\alpha$$
$$W(\vec{F}) = |q|E \cdot AB \cdot \cos\alpha$$
$$W(\vec{F}) = |q|E \cdot AC$$
$$W(\vec{F}) = |q|E \cdot (x_A - x_C)$$
$$W(\vec{F}) = |q|E \cdot (x_i - x_f)$$
$$W(\vec{F}) = -|q|E \cdot (x_f - x_i)$$
$$W(\vec{F}) = -qE \cdot \Delta x \text{ car } q>0$$

b) Expression mathématique dans le cas du déplacement d'une charge négative



$$W(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$$
$$W(\vec{F}) = F \cdot AB \cdot \cos\alpha$$
$$W(\vec{F}) = |q|E \cdot AB \cdot \cos\alpha$$
$$W(\vec{F}) = -|q|E \cdot AB \cdot \cos(\pi\text{-}\alpha)$$
$$W(\vec{F}) = -|q|E \cdot AC$$
$$W(\vec{F}) = -|q|E \cdot (x_A - x_C)$$
$$W(\vec{F}) = -|q|E \cdot (x_i - x_f)$$
$$W(\vec{F}) = |q|E \cdot (x_f - x_i)$$
$$W(\vec{F}) = -qE \cdot \Delta x \text{ car } q<0$$

c) Conclusion

L'expression mathématique du travail de la force électrique $\vec{F}$ s'exerçant sur une charge q quelconque dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$ s'écrit :

$$\boxed{W(\vec{F}) = -qE \cdot \Delta x}$$

où l'axe Ox est parallèle au champ électrique et dirigé dans le sens opposé au vecteur $\vec{E}$.

d) Analogie avec le travail du poids

$$W(\vec{P}) = -mg \cdot \Delta z \text{ et } W(\vec{F}) = -qE \cdot \Delta x$$

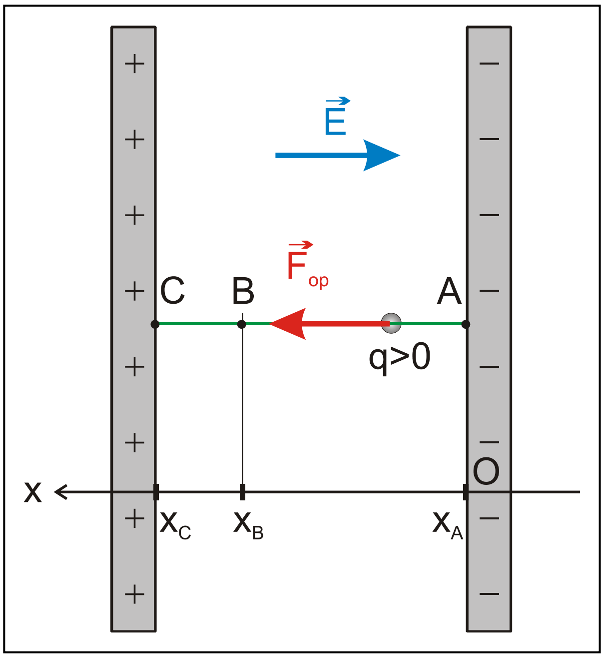
g est l'intensité du champ de pesanteur ; E est l'intensité du champ électrique.
Oz est parallèle à $\vec{g}$, et de sens contraire; Ox est parallèle à $\vec{E}$, et de sens contraire.
Le poids $\vec{P}$ s'exerce sur la masse m ; la force électrique $\vec{F}$ s'exerce sur la charge q.

Attention : m est toujours > 0, mais q peut être > 0 ou < 0 !

2. Energie potentielle d'une charge q placée dans un champ électrique uniforme

a) Variation de l'énergie mécanique d'une charge déplacée dans un champ électrique uniforme

Considérons une particule de charge q > 0 déplacée (à vitesse constante) par une force d'un opérateur $\overrightarrow{F_{op}}$ de la plaque négative A d'un condensateur chargé vers la plaque positive B.



* référentiel : terrestre
* repère cartésien Oxz voir figure
* Système : particule de charge q et de masse m dans le champ électrique uniforme $\vec{E}$ (ce qui revient à englober le condensateur dans le système : la force électrique est donc une force intérieure au système) et le champ de pesanteur $\vec{g}$
* Forces extérieures et leurs travaux :
  - Force de l'opérateur $\overrightarrow{F_{op}}$ opposée à la force électrique : $\overrightarrow{F_{op}} = -\vec{F}$ et $W(\overrightarrow{F_{op}}) = -W(\vec{F})$
  - Les effets du poids de la particule sont négligés : pas de chute.
  - On suppose que l'espace entre les plaques est vide d'air de sorte qu'il n'y a pas de force de frottement.

* Loi : théorème de la variation de l'énergie totale du système :

$$\Delta E = \sum W_{\text{Forces extérieures}}$$

ici : $$\Delta E = W(\overrightarrow{F_{op}})$$

$$\Delta E_c + \Delta E_p = qE \cdot \Delta x$$

Comme la vitesse reste constante l'énergie cinétique ne varie pas et on obtient :

$$\Delta E_p = qE \cdot \Delta x$$

$$E_{p\,C} - E_{p\,A} = qE \cdot (x_C - x_{A})$$

$$E_{p\,C} - E_{p\,A} = qE \cdot x_C - qE \cdot x_{A}$$

L'énergie potentielle acquise s'appelle **énergie potentielle électrique** $E_{p\text{ élect}}$.

Comme l'abscisse en A est nulle, posons $E_{p\text{ élect A}} = 0$ et ainsi $E_{p\text{ élect C}} = qE \cdot x_C$

b) Conclusions : Energie potentielle électrique d'une charge

1. L'énergie potentielle électrique d'une particule de charge q quelconque située en un point d'abscisse x dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$, vaut :

$$\boxed{E_{p\text{ élect}} = qEx}$$

Elle dépend du niveau de référence choisi !

2. La variation de l'énergie potentielle électrique d'une charge q quelconque dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$ vaut :

$$\Delta E_{p\text{ élect}} = qE \cdot \Delta x = -W(\vec{F})$$

Elle est indépendante du niveau de référence choisi.

c) Remarques

1. En A: $x = 0 \Rightarrow E_{p\text{ élect}} = qE\,x_A = 0$ (minimum)

   Le niveau de référence pour l'énergie potentielle électrique est sur la plaque négative.

2. En C: $x = x_C$ (maximum) $\Rightarrow E_{p\text{ élect}} = qE\,x_C$ (maximum)

3: L'axe Ox est toujours parallèle à $\vec{E}$ et orienté dans le sens opposé à $\vec{E}$. L'origine O détermine le niveau de référence.

4: Pour $q < 0$, la formule est la même:
En A : $E_{p\text{ élect}} = 0$ (maximum); en B : $E_{p\text{ élect}} = qE\ x_B < 0$; en C : $E_{p\text{ élect}} = qE\ x_C < 0$ (minimum)

3. Potentiel électrique

a) Définition

Le potentiel électrique V d'un point du champ est égal à l'énergie potentielle $E_{p\ \text{élect}}$ que possèderait une particule charge témoin de charge q=+1 C placée en ce point.

$$\boxed{V = \frac{E_{p\ \text{élect}}}{q}}$$

Cette définition est valable pour un champ électrique quelconque.

b) Unité S.I. pour le potentiel électrique : le volt (V)

Si $E_{p\ \text{élect}}$ = 1 J et si q = 1 C, alors V = 1 J/C = 1 volt = 1 V

c) Potentiel d'un point d'un champ uniforme

Comme $E_{p\ \text{élect}} = qEx$, le potentiel d'un point d'abscisse x s'écrit:

$$\boxed{V = Ex}$$

V ne dépend que de la position du point et du champ électrique.

d) Nouvelle unité pour l'intensité du champ électrique E : le volt/mètre

Dans un champ uniforme $E = \frac{V}{x}$: si V = 1 V, et si x = 1 m, alors E = 1 V/m

Montrer que 1 V/m = 1 N/C

e) Nouvelle expression pour l'énergie potentielle électrique

$$\boxed{E_{p\ \text{élect}} = qV}$$

f) Nouvelle unité pour l'énergie : l'électron-volt

Si q = +e = $+1{,}602\cdot10^{-19}$ C, et si V = 1 V, alors $E_{p\ \text{élect}}$ = 1 eV = 1 électron-volt

1 eV = 1 e·1 V = $1{,}602\cdot10^{-19}$ C·1 V = $1{,}602\cdot10^{-19}$ J

g) Remarque

Dans un champ uniforme, l'axe Ox est dirigé toujours dans le sens des potentiels croissants.

4. Différence de potentiel électrique = tension électrique

a) Définitions

Lorsqu'une charge se déplace d'un point initial A de potentiel $V_i = V_A$ vers un point final B de potentiel $V_f = V_B$, alors la **différence de potentiel** entre le point final et le point initial est :

$$\boxed{\Delta V = V_f - V_i}$$

Une différence de potentiel est encore appelée **tension électrique**.

La **tension entre A et B** est notée : $\boxed{U_{AB} = V_A - V_B}$

On a évidemment : $U_{BA} = V_B - V_A = -U_{AB}$

Souvent on parle de la **tension électrique aux bornes d'un appareil électrique** : il s'agit alors de la différence de potentiel prise positivement : $U = |\Delta V| > 0$.

Sur les schémas, les tensions sont représentées par **des flèches allant du potentiel moins élevé vers le potentiel plus élevé**.

b) Nouvelle expression pour le travail de la force électrique

Dans un champ uniforme : $W(\vec{F}) = -qE \cdot \Delta x$

$$W(\vec{F}) = -qE \cdot (x_f - x_i)$$

$$W(\vec{F}) = -q(E\,x_f - E\,x_i)$$

$$W(\vec{F}) = -q(V_f - V_i)$$

$$\boxed{W(\vec{F}) = -q \cdot \Delta V}$$

(Formule importante à retenir !)

Nous admettons que cette expression est valable également dans des champs non uniformes.

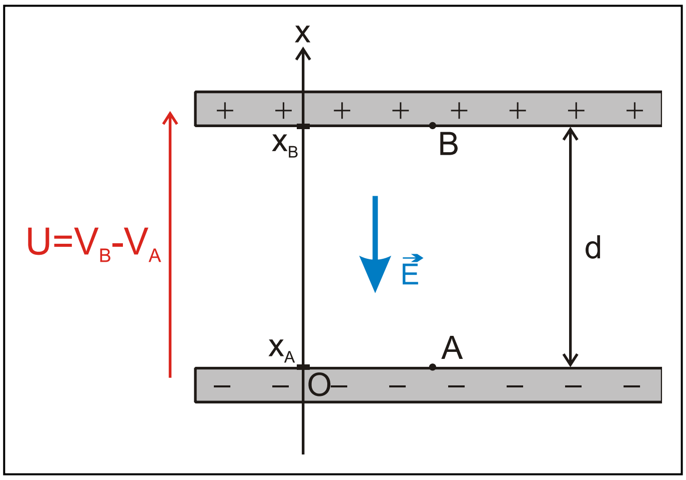
c) Relation entre tension aux bornes d'un condensateur et distance entre les plaques

Appliquons la relation V=Ex aux points A et B :

$V_A = 0$ car $x_A=0$ et $V_B = Ed$ car $x_B=d$

Finalement : $\boxed{U = Ed}$

(Formule importante à retenir !)



5. Application du théorème de l'énergie totale et du théorème de l'énergie cinétique

* L'énergie totale d'une particule de charge q placée dans un champ électrique est la somme de son énergie cinétique et de ses énergie potentielles:

$$E = E_c + E_{p\ pes} + E_{p\ élast} + E_{p\ élect}$$

c'est-à-dire :

$$\boxed{E = \frac{1}{2} m\, v^2 + m\, g\, z + \frac{1}{2}\, k\, x^2 + q\, V}$$

* Si une charge évolue spontanément dans un champ électrique (sans autre force que celle du champ électrique), on peut déterminer sa vitesse acquise au bout d'un certain déplacement

- soit à l'aide du théorème de l'énergie totale:

$$\Delta E = \Sigma\, W\left(\overrightarrow{F_{ext}}\right)$$

Système = corps de masse m et de charge q dans les champs de pesanteur et électrique ;

- soit à l'aide du théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = \Sigma\, W\left(\overrightarrow{F_{ext}}\right)$$

Système corps de masse m et de charge q; poids, tension du ressort et force électrique sont des forces extérieures.

L'origine du repère est placée au point d'équilibre du ressort respectivement au niveau du point ayant l'altitude la moins élevée et le potentiel le moins élevé de même direction et de sens opposé au champ électrique.

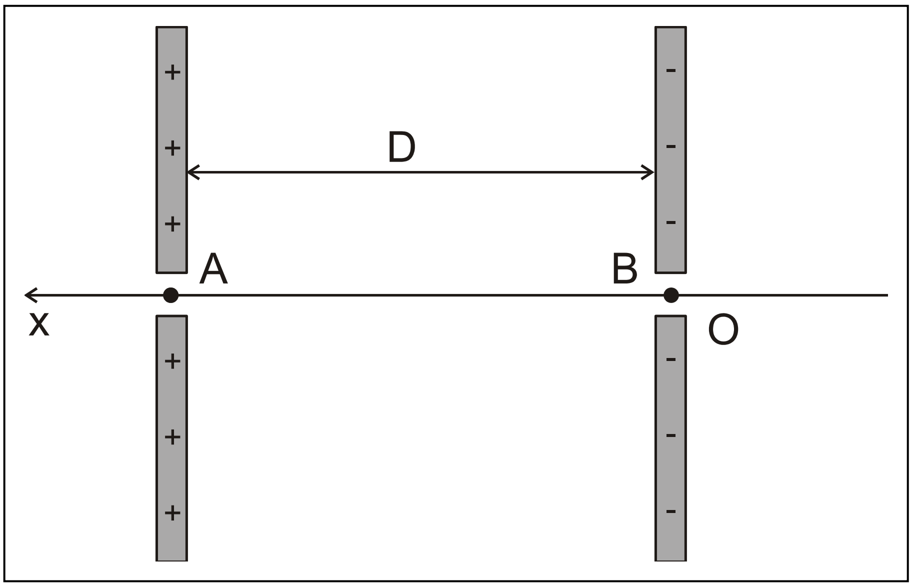
L'axe Ox et parallèle à l'axe du ressort respectivement de même direction et de sens opposé au champ électrique $\vec{E}$.

L'axe Oz est de même direction et de sens opposé au champ de pesanteur $\vec{g}$.

Voir exercices !

Exercice supplémentaire

Une électron est émise au voisinage du point A avec une vitesse initiale de $66 \cdot 10^3$ km/s dirigée vers la plaque B.



a) Quelle tension $U_{AB} = U$ faut-il appliquer entre les plaques distantes de D = 20 cm, pour que la vitesse des particules en B ne soit plus que 10^3 km/s ? *(12,4 kV)*

b) Calculer la vitesse de l'électron à mi-chemin entre A et B. *($46{,}7 \cdot 10^3$ km/s)*

c) Donner les caractéristiques du champ électrique $\vec{E}$ entre les plaques. *(61,9 kV/m)*

d) Quelle est en J, puis en eV, l'énergie cinétique d'une particule en B ? *($4{,}55 \cdot 10^{-19}$ J ; 2,84 eV)*

e) Calculer le potentiel d'un point situé à 5 cm, à 12 cm, à 18 cm de la plaque A. Calculer l'énergie potentielle d'un électron en ces points.

(5 cm: 9,18 kV ; -9,18 keV ; 12cm : 4,90 kV ; -4,90 keV ; 18 cm: 1,22 kV; -1,22 keV)