Le Dipôle électrique

1- Définition :

Un dipôle est une association de deux charges électriques $+q$ et $-q$, séparées par une distance $|\vec{a}|$.

On définit le moment dipolaire par $\vec{P} = q\,\vec{a}$, $\vec{a}$ est orienté de la charge - vers +. Donc, le moment dipolaire est un vecteur orienté du - vers le +. Son point d'application est le milieu des deux charges :

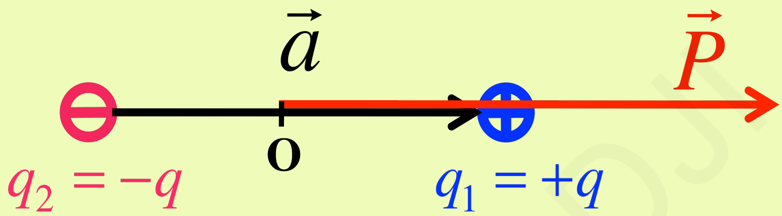


Figure 1.

On retrouve les dipôles parmi les molécules. Certaines molécules dites "dipolaire" ont des charges + et – séparés dans l'espace, comme la molécule d'eau H_20, l'acide chlorhydrique HCL, le monoxyde de carbone CO, etc..

Quel est l'intérêt d'étudier les dipôles ?

Un dipôle présente dans l'espace un champ électrique assez spécial, différent du champ coulombien. Comme le dipôle est un objet élémentaire, c'est à dire qu'il ne se décompose pas, on peut considérer que le champ électrique qu'il crée est aussi élémentaire, bien qu'en réalité c'est un champ composé des deux champs coulombiens des charges qui le compose.

2- Champ et potentiel électriques créés par un dipôle :

Il est plus facile de commencer par le potentiel ensuite le champ, puisque le champ dérive du potentiel.

2-1 : Le potentiel :

Le potentiel créé par les deux charges q_1 et q_2 au point M est donné par la somme des deux potentiels élémentaires (coulombiens) de chacune des charges :

$$\begin{aligned} V_{q_1,q_2/M} &= V_{q_1/M} + V_{q_2/M} \\ &= k\frac{q}{r_1} - k\frac{q}{r_2} \\ &= kq\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \end{aligned}$$

Pour développer la dernière expression, nous allons faire un peut de géométrie :

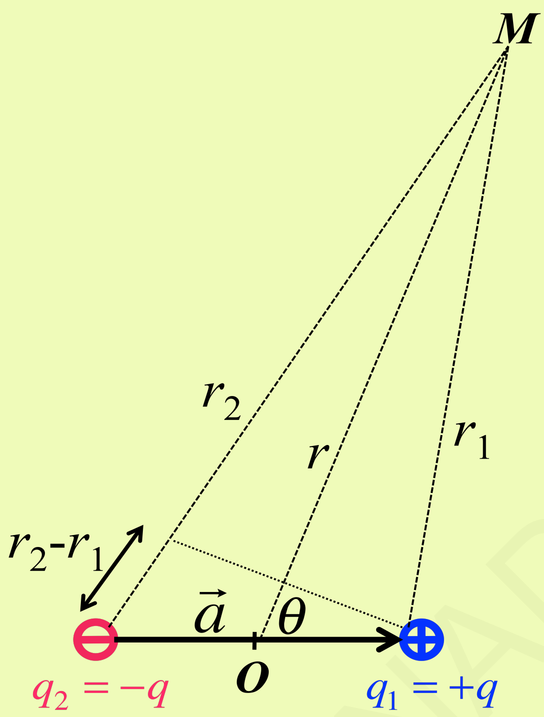


Figure 2.

D'après la figure, on a :

$$r_2 - r_1 \simeq a\cos(\theta)$$
$$r_1 r_2 \simeq r^2$$

On remplace et on trouve :

$$V_{q_1,q_2/M} = k\,q\,a\frac{\cos(\theta)}{r^2}$$

On remplace qa par p et on obtient une quantité qui ne dépend que du moment dipolaire p et non des charges élémentaires :

$$\boxed{V_{p/M} = k\,p\,\frac{\cos(\theta)}{r^2}}$$

Nous voyons donc que la charge a disparu laissant place au moment dipolaire p. On peut considérer donc que ce potentiel est "le potentiel élémentaire créé par un dipôle". Ce potentiel est très différent du potentiel coulombien en deux choses :

1- Il varie en $1/r^2$ alors que le potentiel coulombien varie en $1/r$.

2- Il dépend de l'orientation θ par rapport au dipôle alors que le potentiel coulombien ne dépend pas de l'orientation.

2-2 : Le champ électrique :

Puisque le champ électrique dérive du potentiel V, il va s'écrire comme une dérivée dans l'espace du potentiel V. Ici on ne prend pas tout l'espace car un plan suffit à définir le champ. En effet, le vecteur champ et le vecteur moment dipolaire se trouvent sur un même plan qui est le plan de la figure 2. Ce plan sera repéré par les coordonnées polaires (r, θ) de vecteurs unitaires $\vec{u}_r$ et $\vec{u}_\theta$ (voir la figure 3) :

$$\vec{E}_{p/M} = E_r \vec{u}_r + E_\theta \vec{u}_r$$

On a : $E_r = -\left(\dfrac{\partial V}{\partial r}\right)$ et $E_\theta = -\dfrac{1}{r}\left(\dfrac{\partial V}{\partial \theta}\right)$, soit :

$$\boxed{\begin{array}{l} E_r = 2\,k\,p\,\dfrac{\cos(\theta)}{r^3} \\ E_\theta = k\,p\,\dfrac{\sin(\theta)}{r^3} \end{array}}$$

Ici également, les composantes du champ dépendent de la distance r et de l'orientation θ. Le champ dipolaire varie en $1/r^3$ alors que le champ coulombien varie en $1/r^2$.

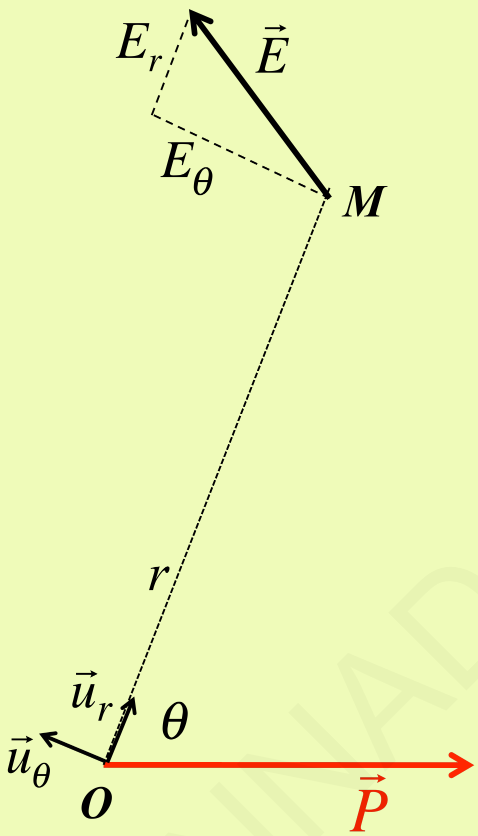


Figure 3.

3- Un dipôle placé dans un champ électrique extérieur :

On va voir comment interagit le dipôle avec d'autres dipôles ou d'autres charges. Il interagit avec le champ de ces charges qu'on nome par $\vec{E}$. $\vec{E}$ n'est pas le champ du dipôle lui même mais un champ extérieur au dipôle.

Un dipôle placé dans un champ électrique $\vec{E}$ va tourner autour de son centre vers sa position d'équilibre. Il va subir un couple de force donné par :

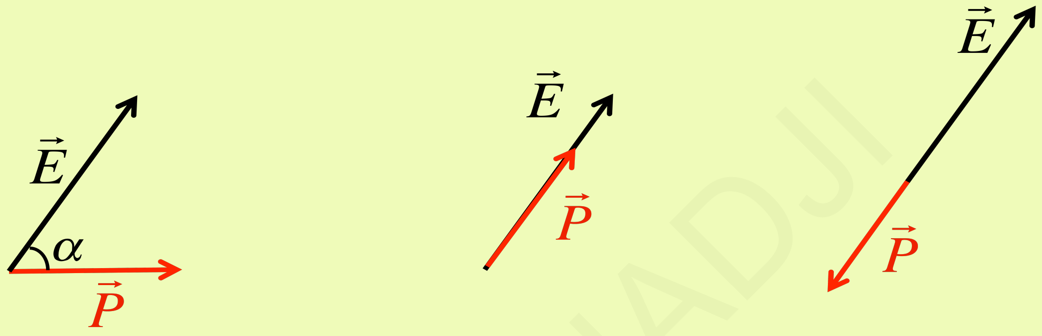
$$\vec{\Gamma} = \vec{P} \times \vec{E}$$

Le signe $\times$ signifie produit vectoriel. Toutes les grandeurs ici sont des vecteurs. Le couple $\vec{\Gamma}$ fait tourner le dipôle vers sa position d'équilibre stable qui est la position ou $\vec{P}$ est parallèle à $\vec{E}$ et dans le même sens.

Un dipôle dans un champ électrique va posséder une énergie potentielle donnée par :

$$
\begin{aligned}
E_P &= -\vec{P} \bullet \vec{E} \\
&= -P\,E\cos(\alpha)
\end{aligned}
$$

α est l'angle entre le dipôle et le champ électrique. Nous voyons que l'énergie potentielle prend sa valeur minimum pour α=0 et prend sa valeur maximum pour α=180°. Ce qui veut dire, lorsque $\vec{P}$ est aligné dans le même sens que $\vec{E}$, le dipôle est dans une position d'équilibre stable, lorsqu'il est aligné dans le sens contraire, il est dans une position d'équilibre instable, voir figure 4.



Cas général

Equilibre stable
$\alpha = 0$

Equilibre instable
$\alpha = 180°$

Figure 4.

Remarque : Le champ $\vec{E}$ n'est pas celui créé par le dipôle mais un champ extérieur appliqué sur le dipôle.

Exemple d'application :

La molécule de Fluorure d'hydrogène H-F, constitue un dipôle avec deux charges $+q$ et $-q$, $q = 0.7 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$, séparées par une distance $a = 9 \times 10^{-11}\,\mathrm{m}$.

1- Déterminer le moment dipolaire de cette molécule.

2-a- Déterminer le potentiel et les composantes du champ électrique qu'elle crée au point A sur la figure 5.

2-b- Mêmes questions pour le point B sur la figure 5.

3- Le dipôle qui représente la molécule est placé dans un champ électrique $\vec{E}$ comme le montre la figure 6.

3-a- Calculer la valeur de l'énergie potentielle du dipôle.

3-b- Représenter le dipôle à sa position d'équilibre stable et déterminer son énergie potentielle en cette position.

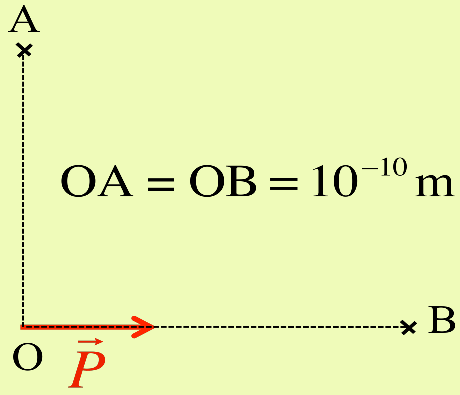


Figure 5.

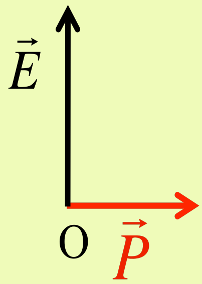


Figure 6.

Solution :

1- Le moment dipolaire :

$$\begin{aligned} P &= q\,a \\ &= 0.7\times10^{-19}\times9\times10^{-11} \\ &= 6.3\times10^{-30}\ \text{C m.} \end{aligned}$$

2 - a- Le potentiel au point A :

$$V_A = k\,p\,\frac{\cos(\theta)}{r^2}$$

L'angle entre le dipôle et OA est 90°, et cos(90) =0. On déduit que V_A=0 volt.

On calcule les deux composantes du champ électrique :

La composante radiale :

$$\begin{aligned} E_r &= 2\,k\,p\,\frac{\cos(\theta)}{r^3} \\ &= 0\ \text{V/m.} \qquad \text{(Puisque } \theta = 90 \text{ et } \cos(90)=0) \end{aligned}$$

La composante transversale :

$$\begin{aligned} E_\theta &= k\,p\,\frac{\sin(\theta)}{r^3} \\ &= \frac{k\,p}{r^3} \\ &= 9\times10^9\,\frac{6.3\times10^{-30}}{10^{-30}} \\ &= 5.67\times10^{10}\ \text{Volt/m.} \end{aligned}$$

2 - b- Pour le point B on a θ = 0°, ce qui donne :

$$\begin{aligned} V_B &= \frac{k\,p}{r^2} \\ &= 9\times 10^9\,\frac{6.3\times 10^{-30}}{10^{-20}} \\ &= 5.67 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

La composante radiale du champ :

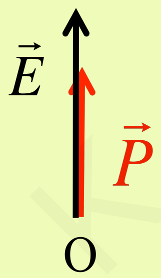
$$\begin{aligned} E_r &= 2k\,\frac{p}{r^3} \\ &= 2\times 9\times 10^9\,\frac{6.3\times 10^{-30}}{10^{-30}} \\ &= 11.34\times 10^{10} \text{ Volt/m.} \end{aligned}$$

La composante transversale $E_\theta = 0$ Volt/m (puisque $\sin(\theta)=0$).

3- a- L'énergie potentielle du dipôle dans le champ électrique est donnée par :

$$\begin{aligned} E_p &= -P\,E\cos(\alpha)\ , \quad \text{(puisque } \alpha = 90°,\ \cos(\alpha)=0) \\ &= 0 \text{ Volt/m} \end{aligned}$$

3- b-



$$\begin{aligned} E_p &= -P\,E\cos(0) \\ &= -P\,E \\ &= -6.3\times 10^{-30}\times 10^{12} \\ &= -6.3\times 10^{-18} \text{ Joule.} \end{aligned}$$